

宇宙開発応用特論 (Applied Space Development Engineering)

実践的な宇宙通信概論と宇宙通信機器技術 2 / 3

第2回 2001年1月12日(予備2月2日)

白子悟朗

(技術士:航空・宇宙部門)

E-mail goro-shirako@mui.biglobe.ne.jp

HP-url <http://www2s.biglobe.ne.jp/~gshirako/>

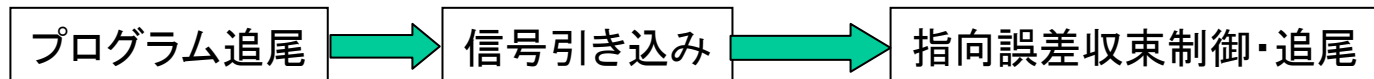
第2回 講義内容

- アンケート回答に触れて
- 衛星システムにおける通信系設計概要
 - 通信系設計の範囲と成立条件
 - 通信システム構成と制約事項
 - 通信システム設計上の留意点
 - 回線設計とハードウェア実現性
- 宇宙技術者の心得...レジュメは第1回参照
 - 技術継承

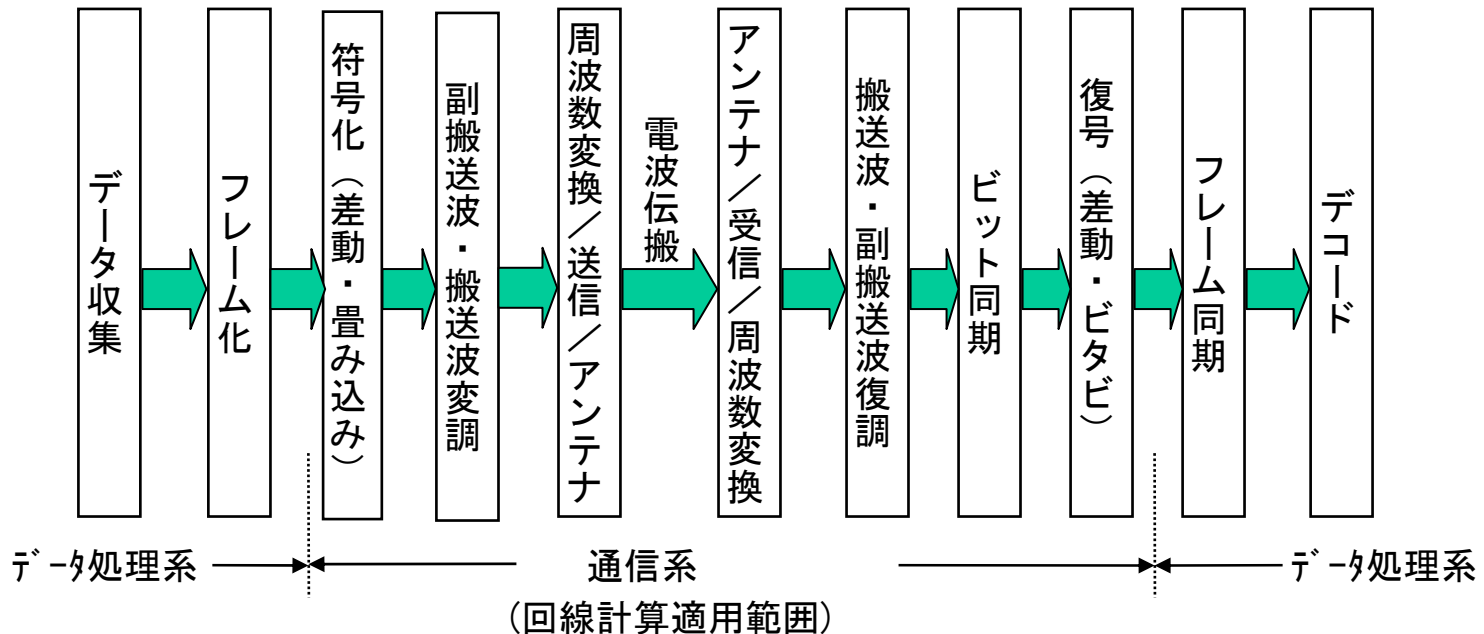
通信系設計範囲と成立条件

リンク形成手順

空間領域捕捉追尾



信号伝送フロー



通信システム設計

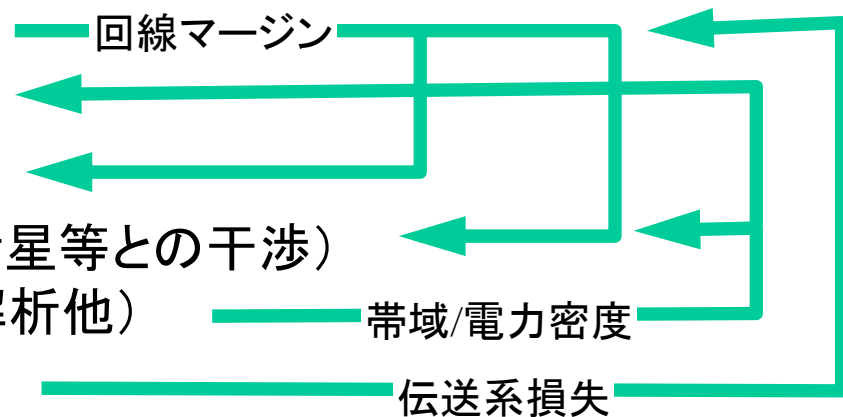
解析項目と相互関連性

通信系解析の目的

- ・ハードウェア構成・仕様設定
- ・事前公表・無線局申請源泉資料
- ・運用ベースライン設定
- ・外部システムとの共存性調整

主要解析項目

- ・回線解析
- ・PFD解析
- ・運用解析(通信時間帯解析等)
- ・干渉解析(衛星内部干渉／他衛星等との干渉)
- ・スペクトラム解析(占有帯域幅解析他)
- ・信号品質解析



通信システム構成と制約事項

無線通信で扱う信号

通信手段

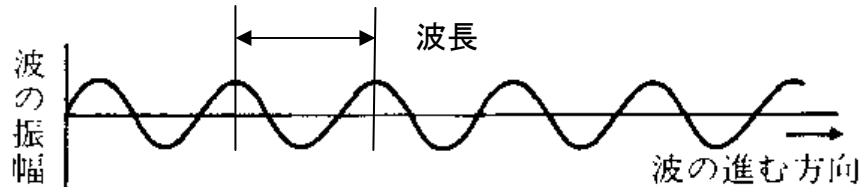
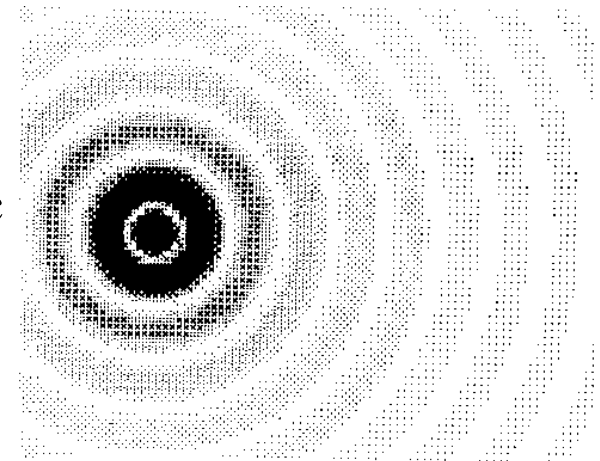
・通信媒体：音波と電波

音波：空気が振動し伝搬、速度=約 340m/sec

電波：電磁誘導で伝搬、速度=光速=約 30万km/sec

[共に周波数が異なっても速度は一定。]

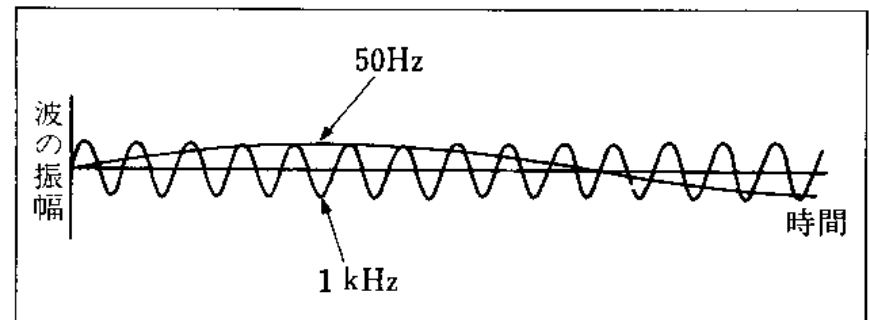
波長×周波数=一定]



周波数=1秒間当たりの振動数

波源の振幅の時間変化が大きいほど、発生する波の振幅も大きい
(放射原理)

→低周波は電波が発生しにくい。



通信システム構成と制約事項

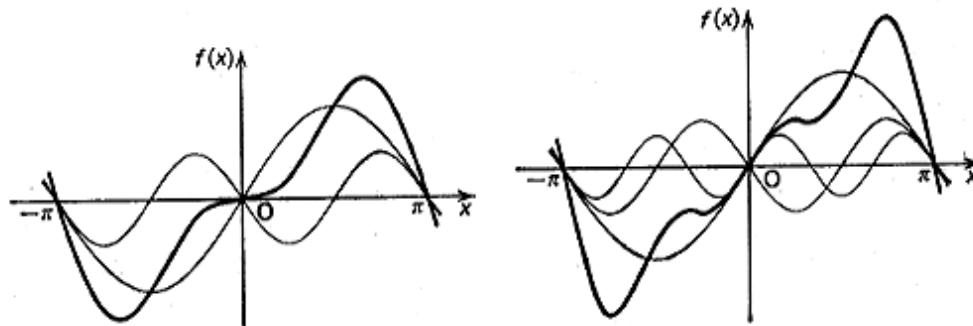
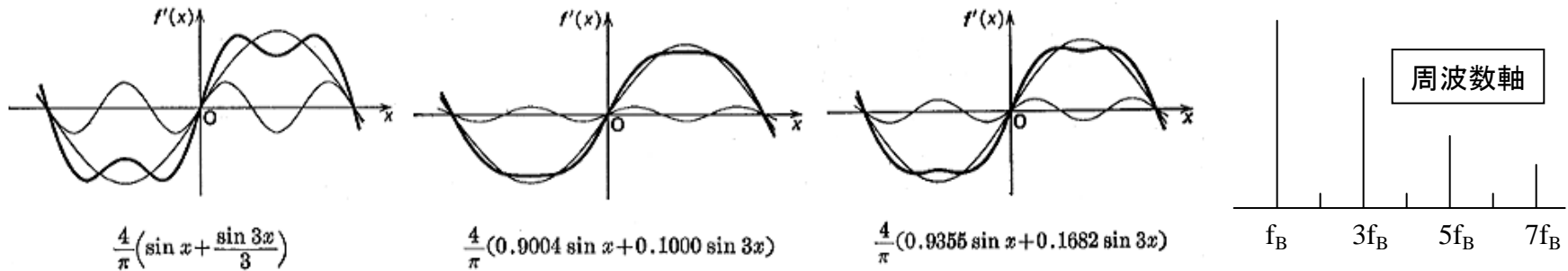
無線通信で扱う信号

時間軸と周波数軸

フィルタ以外の回路動作は時間軸解析が基本
 外部干渉等の評価は周波数軸解析が一般的
 時間軸と周波数軸の変換には高速フーリエ変換(FFT)使用

パルス波形の周波数構成

立ち上がりが急峻ほど高次成分発生



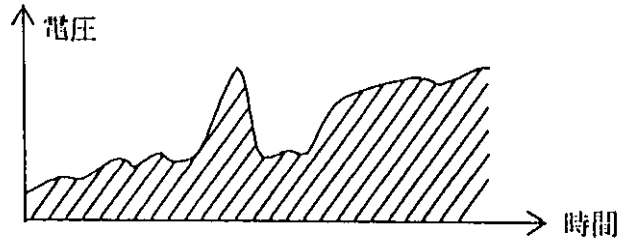
非線形素子による多数の高調波発生、
 複数波(スプリアス含む)同時伝送の場合
 時間軸波形では現象解明困難。

通信システム構成と制約事項

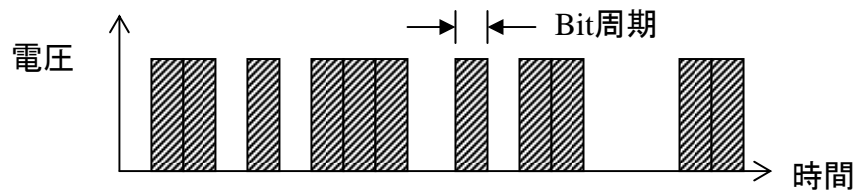
無線通信で扱う信号

・情報源: アナログとデジタル

アナログ: 連続する時間に対し振幅が変化



デジタル: 決められた時間周期で振幅が一定



電圧値は1又は0のどちらか

	アナログ	デジタル
短所	雑音に弱い	帯域が広い
長所	帯域が狭い	雑音に強い 信号処理が可能

アナログ→デジタル主流へ

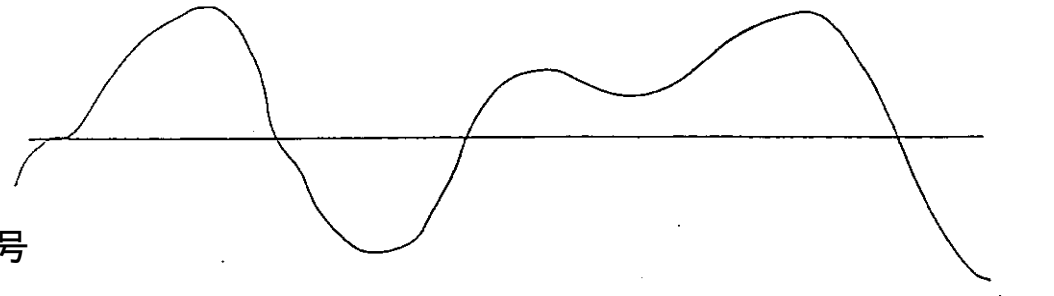
通信システム構成と制約事項

無線通信で扱う信号

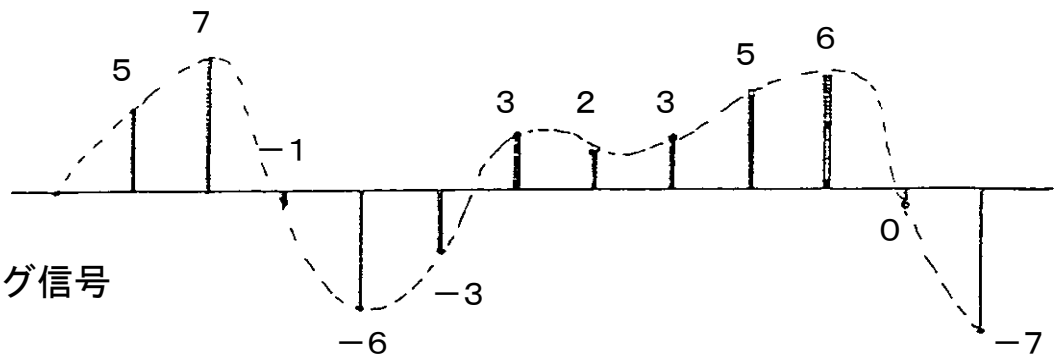
アナログデータの デジタルへの変換

サンプリング周期は計測時間分解能により、量子化bit数は振幅分解能より設定。コストとのトレードオフが必要。

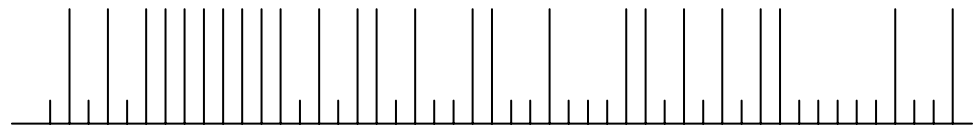
アナログ信号



サンプリング信号



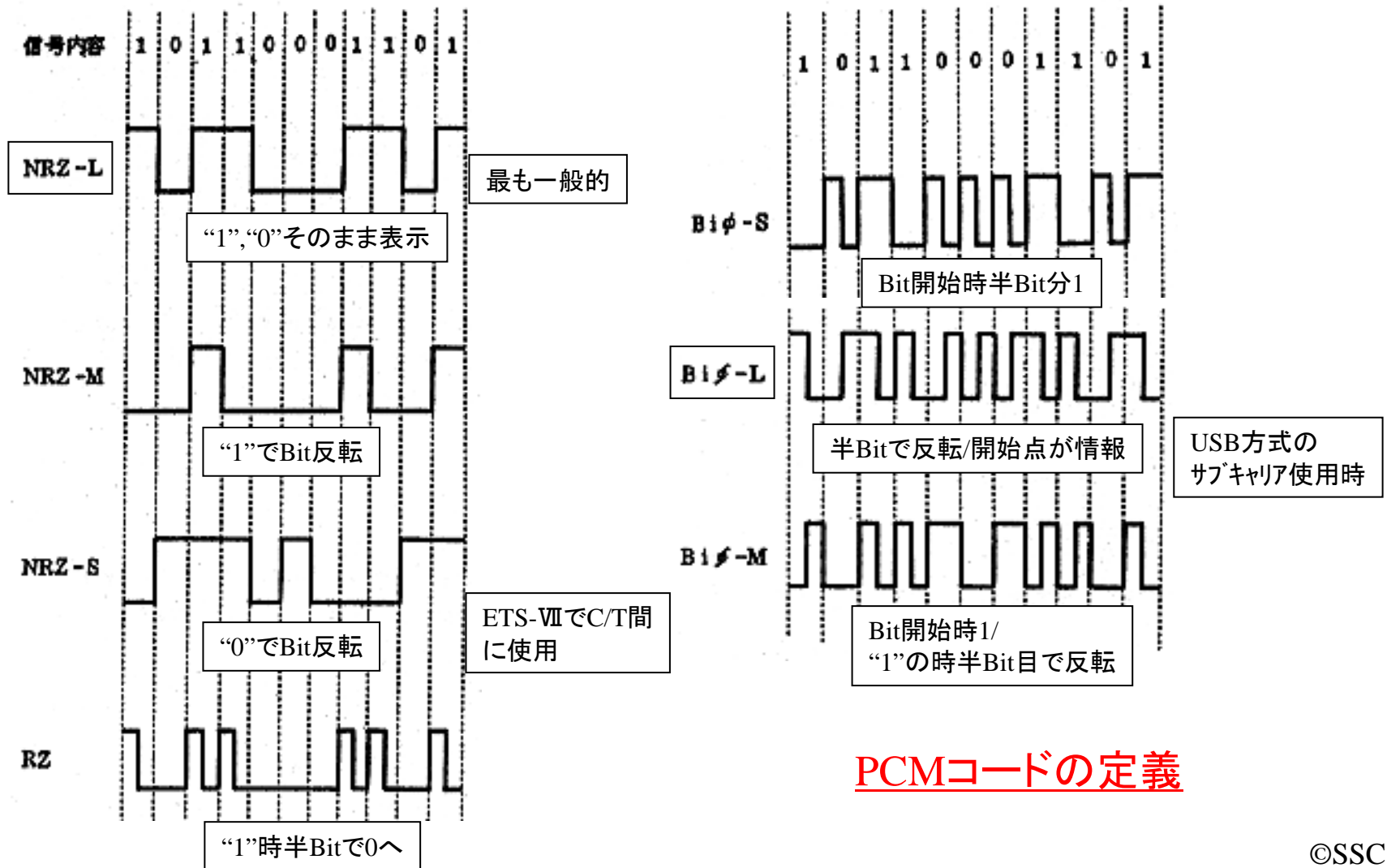
Bit rate =
サンプル周期 × 量子化bit数



PCM(Pulse Coded Modulation)信号

通信システム構成と制約事項

無線通信で扱う信号



通信システム構成と制約事項

通信機器構成要素と役割

無線通信に必要な機能

[送り側]

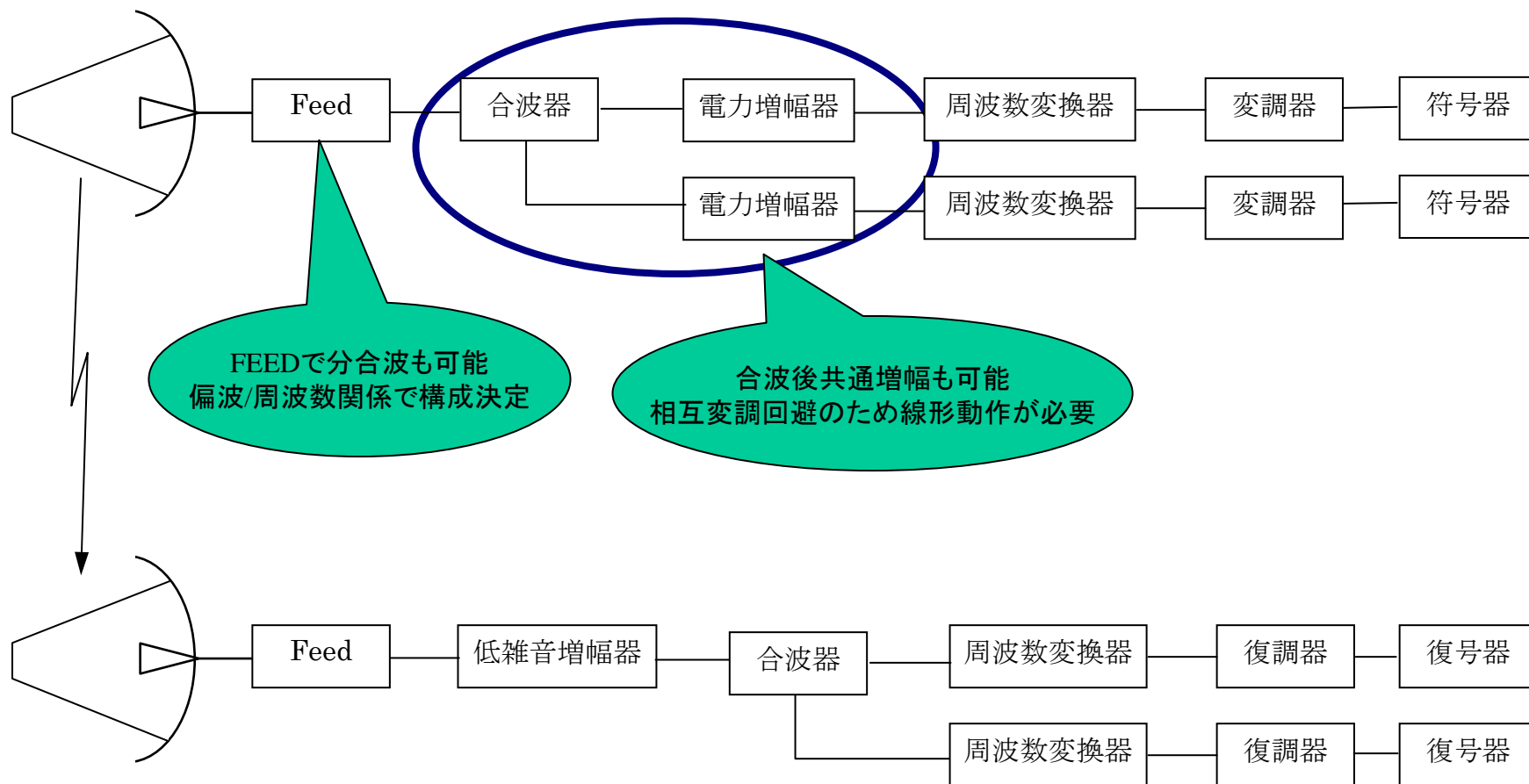
- ・相手が正確な情報を得られる様支援する(誤りの訂正)→符号器
- ・情報を通信媒体(電波)に乗せる→変調器
- ・割り当てられた電波(周波数)に変換する→周波数変換器
- ・相手側が信号検出できるだけの強度に保つ→電力増幅器
- ・目的の異なる電波を合成する→合波器
- ・相手方(空間)に電波を放射する→アンテナ

[受け側]

- ・相手方(空間)から電波を吸収する→アンテナ
- ・信号検出の基盤となる雑音レベルを押さえる→低雑音増幅器
- ・目的の異なる電波を合成する→合波器
- ・割り当てられた電波を処理しやすい周波数に変換する→周波数変換器
- ・通信媒体(電波)から情報を抽出する→復調器
- ・相手かrの情報を復元する→復号器

通信機器構成要素と役割

通信機器構成



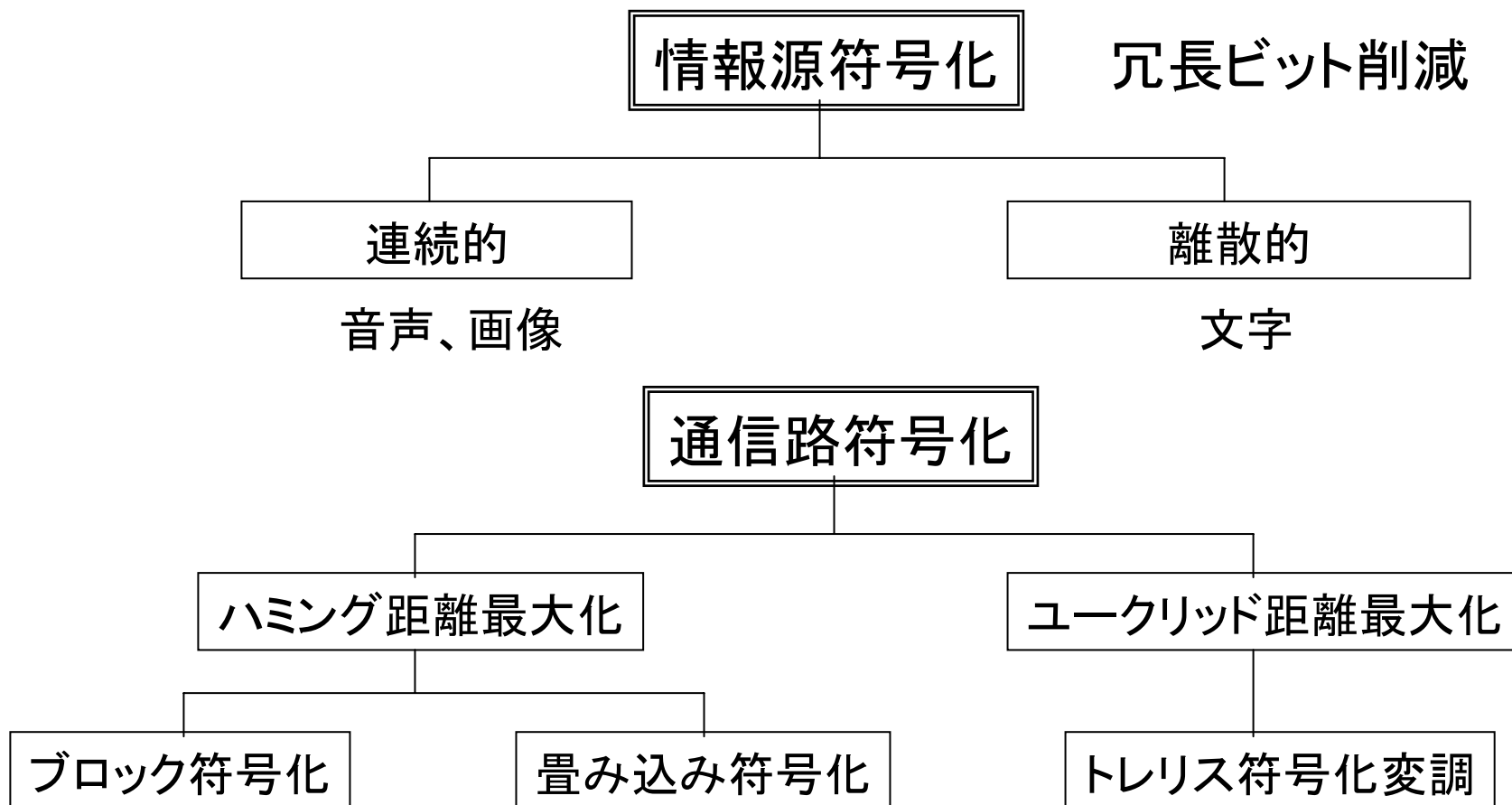
通信機器構成要素と役割

通信系の構成要素

アンテナ機器	無指向性		ダイポール,
	高利得アンテナ	(単一非鏡面)	ヘリカル, ホーン
		鏡面アンテナ	パラボラ, グレゴリアン
		フェーズドアレイアンテナ	
	指向制御系		追尾受信機+APE+APM
送受信機	送信機	(信号系)	符号器+変調器+周波数変換器 +電力増幅器
		(局発系)	発振器+逡倍器
	受信機	(信号系)	低雑音増幅器+周波数変換器+ 復調器+ビット同期回路+復号器
		(局発系)	発振器+逡倍器
	共用部		ダイプレキサ, スイッチ
中継器	受信部	低雑音増幅器+周波数変換器+ チャンネル分波器	
	送信部	ドライブ増幅器+電力増幅器+ チャンネル合波器	

通信機器構成要素と役割

符号器



ビタビ復号:ソフトディシジョン/ハードディシジョン

通信機器構成要素と役割

変調器

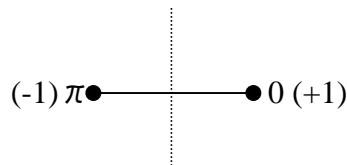
機能: 情報を電波に乗せる

種類: 振幅変調、周波数変調、位相変調 [アナログ変調]

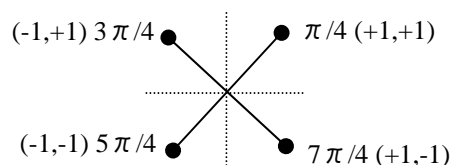
BPSK、QPSK、8相PSK、16値PAM他 [デジタル変調]

留意事項: 多値変調は帯域幅削減に有効だがEb/Noも高い

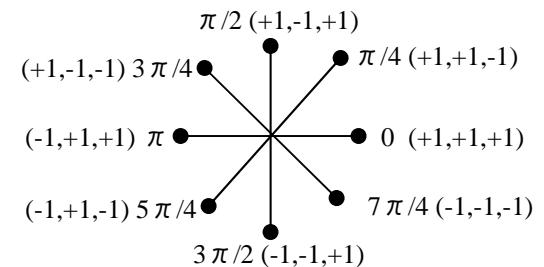
$$BW_{BPSK} = 2 \times BW_{QPSK} = 3 \times BW_{8相PSK}$$



BPSK



QPSK



8相PSK

電力スペクトル密度

$$G(f) = \frac{2P_t \sin^2(2\pi f/R_s)}{R_s (2\pi f/R_s)^2} \quad [W/Hz]$$

P_t = 出力電力

f = オフセット周波数

R_s = シンボルレート

通信機器構成要素と役割

変調器

アナログ変調方式

TT&Cには位相変調(PM)方式を標準的に使用。
商用衛星で周波数変調(FM)を用いるケースも多い。
振幅変調(AM)は雑音に弱い。

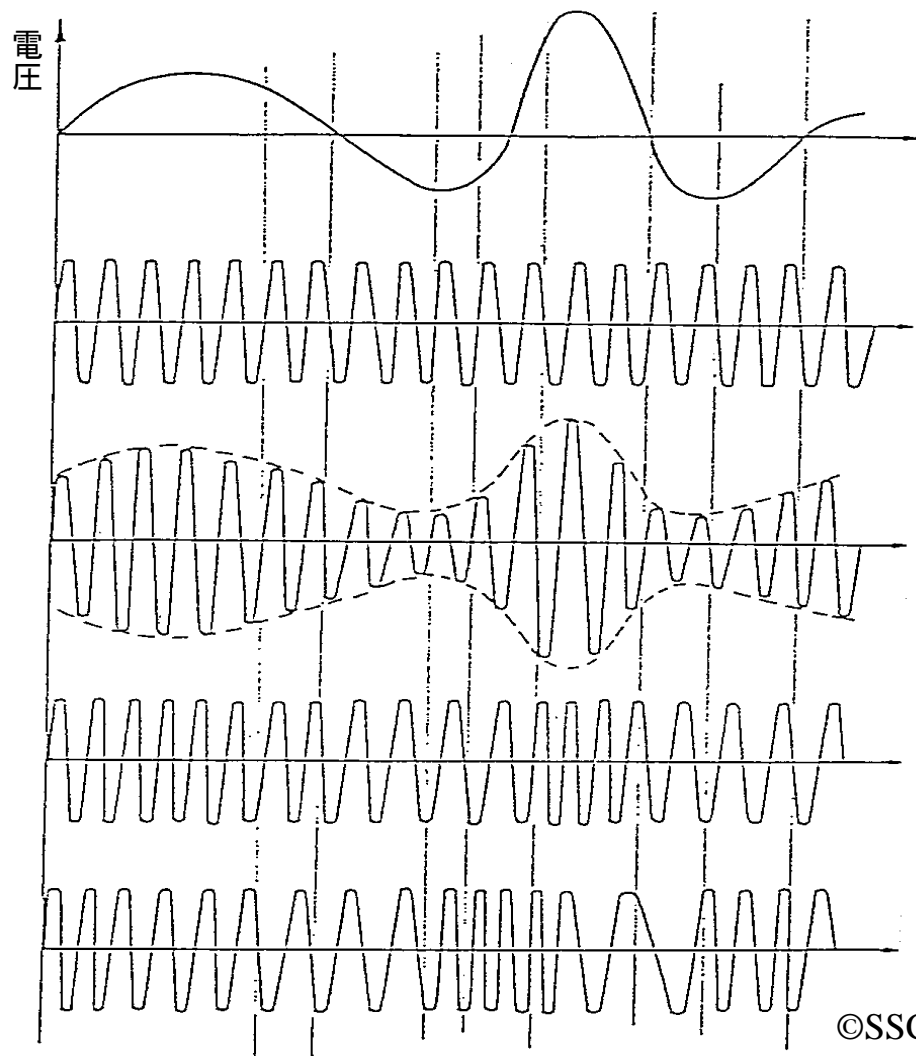
変調信号

搬送波

AM変調波
[振幅変調]

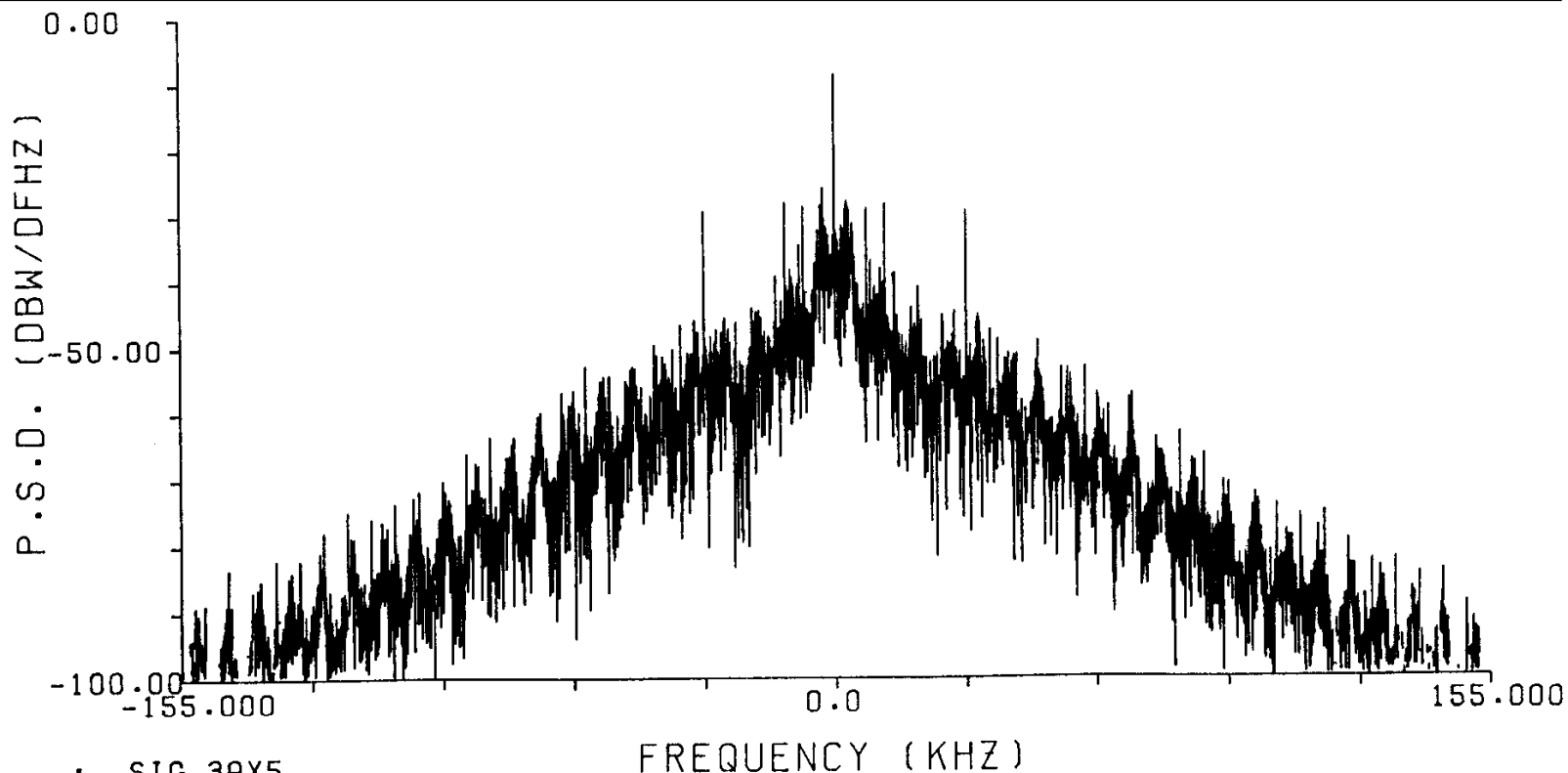
FM変調波
[周波数変調]

PM変調波
[位相変調]



通信機器構成要素と役割

変調器(変調波形例)



CARRIER : SIG.3AX5
 LINK : DOWN
 MODULATION : PM
 TX POWER : -7.000(DBW)
 FILTER : YES
 FREQ. DEV. : 76.255(KHZ)
 DF : 0.076(KHZ)
 P.S.D. MAX.: -8.53(DBW/DFHZ)
 BW : 214.798(KHZ)

BASEBAND	WAVEFORM	FREQUENCY(KHZ)	MOD. INDEX (RAD)
BAS.3AX3	RZ	2.800	0.400
BAS.3AX4	BI	3.700	0.400
BAS.3AX5	SIN	7.500	0.200
BAS.3AX6	SIN	11.900	0.200
BAS.3AX7	SIN	31.000	0.200

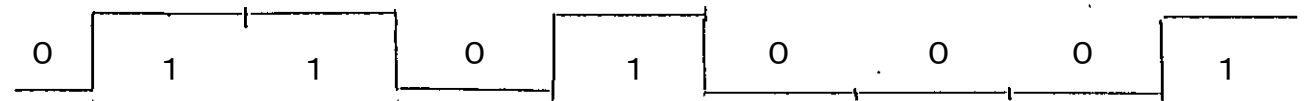
通信機器構成要素と役割

変調器

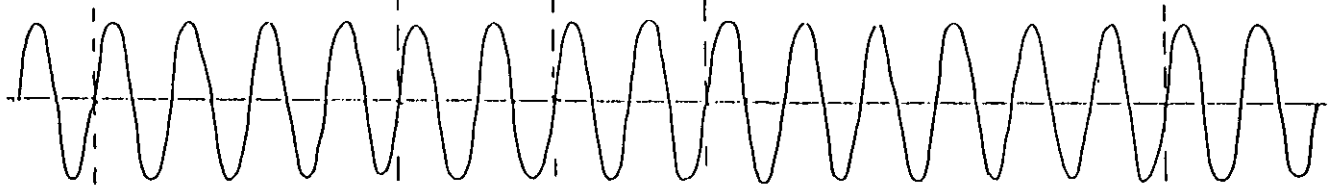
位相変調の一種で、位相変移を $\pm 180^\circ$ として、搬送波成分を抑圧した変調方式がBPSK又はPSK。

QPSKはBPSK信号を 90° 位相シフトして合成して実現

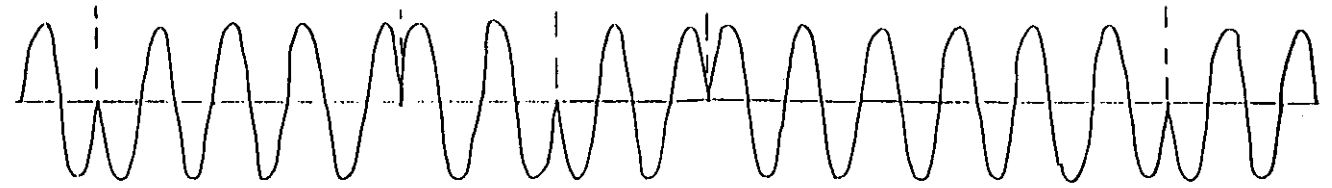
デジタルデータ



搬送波



BPSK変調波



通信機器構成要素と役割

発振器

機能 : 共振回路を用いて高安定な周波数を発生

種類 : 水晶発振器、SAW発振器、LC発振器

安定度向上化対策:

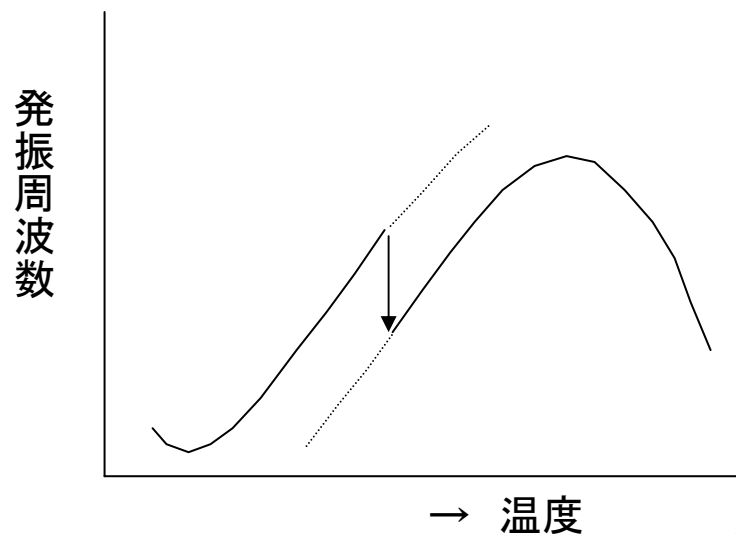
パッシブ温度制御(TCXO)、アクティブ温度制御(OCXO)

留意事項 : 高周波源振ほど高スペクトラム純度(位相雑音)
[逓倍により $20 \times \log(\text{逓倍数})$ だけ悪化]

アクティビティディップ

水晶発振器において、
ある温度で別の共振
モードに移行する現象

受信側ロックオフ発生



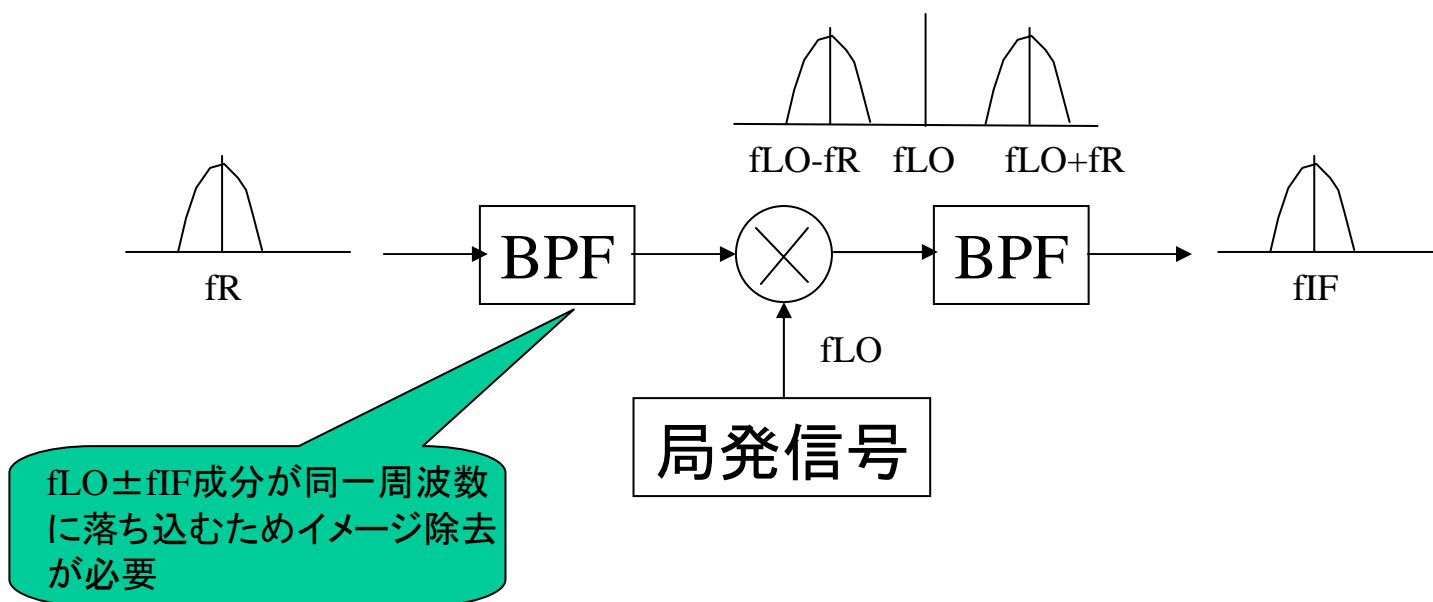
通信機器構成要素と役割

周波数変換器

機能: 局発信号を用いて希望の周波数に変換する

種類: アップコンバータ、ダウンコンバータ

留意事項: 各周波数関係はフィルタ実現性を考慮



通信機器構成要素と役割

フィルタ

機能: 希望波を抽出し、不要波を抑圧する

BPF, BRF, LPF, HPF 及び ダイプレクサ/トリプレクサ等

種類: 水晶フィルタ、SAWフィルタ、空洞共振型他

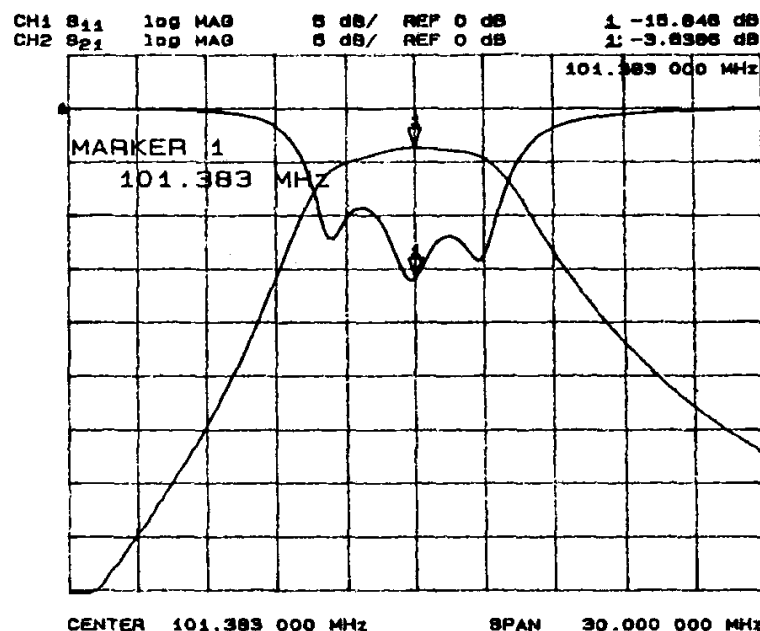
留意事項: 抑圧周波数成分は反射又は熱として吸収

放送衛星の無入力動作制限、他チャンネルへの不要波出力

・高出力動作時の放電対策 (打ち上げ時の低真空度環境等)

・高次モード共振により、
高調波抑圧は困難

- ・比帯域 (帯域幅/中心周波数) は数%程度が一般的
- ・比帯域が小さいほど挿入損失大



通信機器構成要素と役割

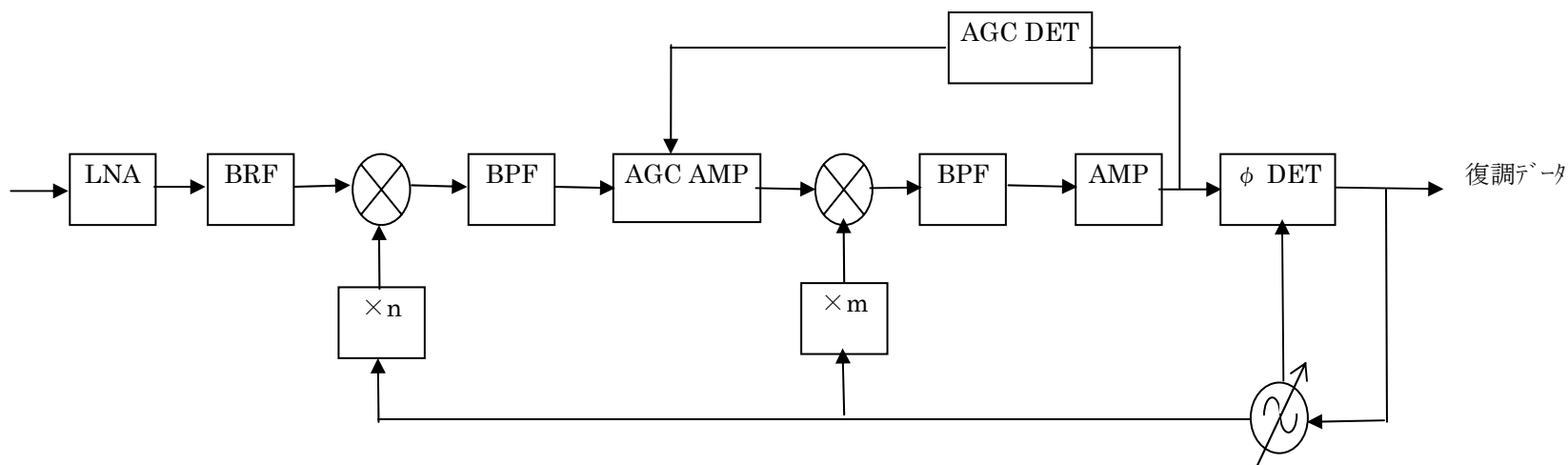
復調器

機能: 入力信号から変調信号(情報)を抽出する。

種類: 位相同期型(PLL)受信機、コスタスループ受信機他

留意事項: 伝送路の影響考慮(ループ帯域等)

USB送受信機受信部構成



通信システム構成と制約事項

海外局の相互運用支援／

既存地上設備適合上の制約

海外地上局の支援対応

目的: 打ち上げ時等、国内局不可視域でのTLM/CMD支援

適合項目: 周波数、変調方式、測距中継特性、伝送レート範囲等

留意点: 残留搬送波方式を前提とし、SFCG動向に不整合

TDRS, ARTEMISの支援対応

目的: 国内データ中継衛星イメージンシー/過負荷対応 他

適合範囲: SSAに関しては全般。KSAは周波数/伝送帯域程度

留意点: ESAシステムは多国籍集団によりノンコヒーレントシステム

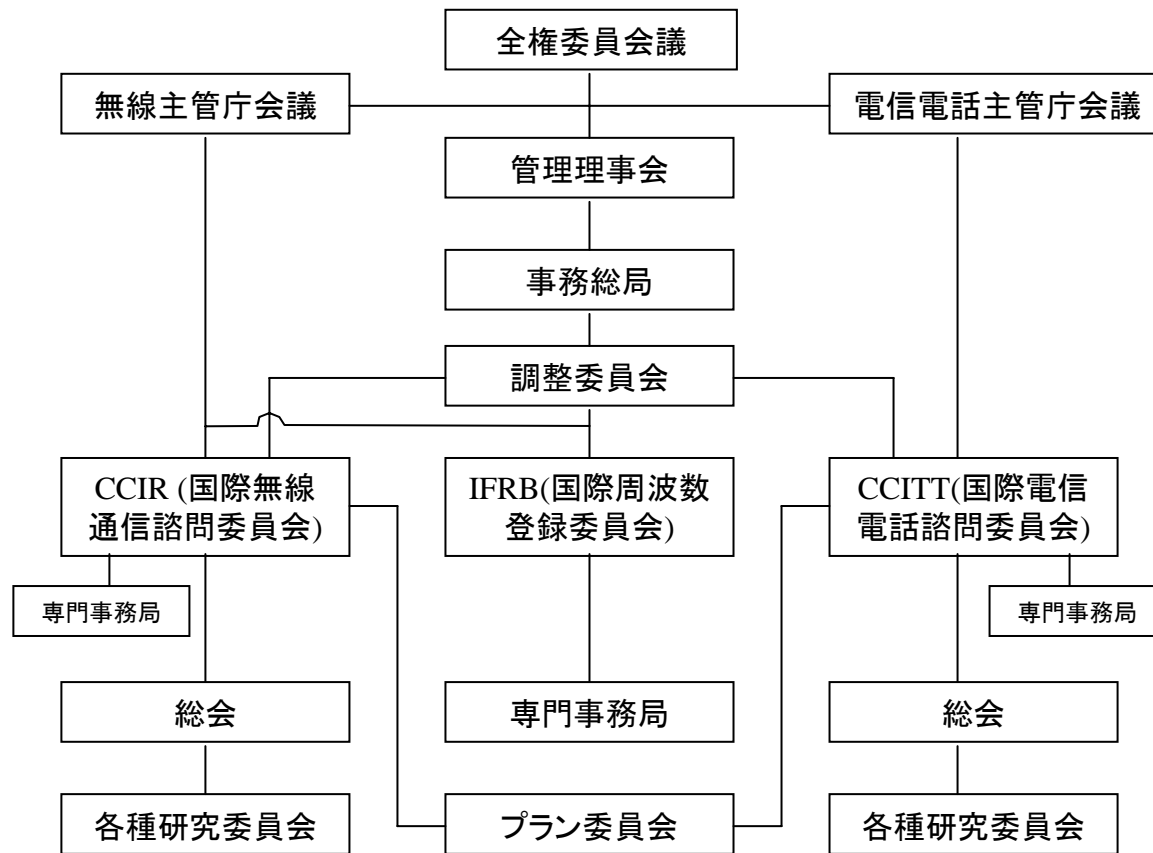
符号化前提のシステム構築により通信性能が全般に低い

実績: NASA TDRSSとはETS-VIIで運用中

ESA ARTEMISとはOICETSで通信実験計画中

通信システム構成と制約事項

RR/SFCG勧告等の制約事項とインパクト



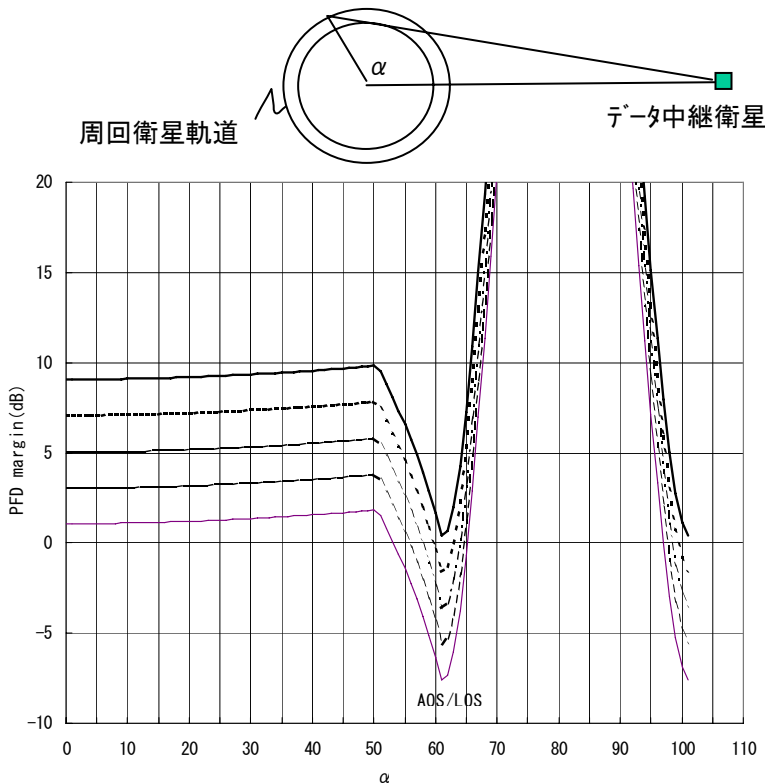
ITUの組織

電力束密度規定／電波天文バンド保護／深宇宙業務バンド保護
スプリアス規定 他

RR/SFCG勧告等の制約事項とインパクト 電力束密度(PFD)規定

規定文書: 無線通信規則
規定内容: 右表による

適用例: KSAフォワードの場合



周波数帯	到来角 (δ) (注1)	電力束密度(注2)の許容値
1. 400.15 - 401 MHz		-125dB
2. 1,670 - 1,700 MHz		-133dB
3. 1,525 - 1,530 MHz 1,670 - 1,690 MHz 1,700 - 1,710 MHz 2,025 - 2,110 MHz 2,200 - 2,300 MHz	$0^\circ \leq \delta \leq 5^\circ$	-154dB
	$5^\circ < \delta \leq 25^\circ$	$-154 + 0.5(\delta - 5)$ dB
	$25^\circ < \delta \leq 90^\circ$	-144dB
4. 3.4 - 4.2 GHz 4.5 - 4.8 GHz 7.25 - 7.75 GHz	$0^\circ \leq \delta \leq 5^\circ$	-152dB
	$5^\circ < \delta \leq 25^\circ$	$-152 + 0.5(\delta - 5)$ dB
	$25^\circ < \delta \leq 90^\circ$	-142dB
5. 8.025 - 8.5 GHz 10.7 - 11.7 GHz	$0^\circ \leq \delta \leq 5^\circ$	-150dB
	$5^\circ < \delta \leq 25^\circ$	$-150 + 0.5(\delta - 5)$ dB
	$25^\circ < \delta \leq 90^\circ$	-140dB
6. 12.2 - 12.75 GHz	$0^\circ \leq \delta \leq 5^\circ$	-148dB
	$5^\circ < \delta \leq 25^\circ$	$-148 + 0.5(\delta - 5)$ dB
	$25^\circ < \delta \leq 90^\circ$	-138dB
7. 17.7 - 19.7 GHz 22.55 - 23.55 GHz 24.45 - 24.75 GHz 25.25 - 27.5 GHz 27.501 - 29.999GHz 31.0 - 31.3 GHz 34.7 - 35.2 GHz 37.0 - 40.5 GHz	$0^\circ \leq \delta \leq 5^\circ$	-115dB
	$5^\circ < \delta \leq 25^\circ$	$-115 + 0.5(\delta - 5)$ dB
	$25^\circ < \delta \leq 90^\circ$	-105dB

RR/SFCG勧告等の制約事項とインパクト 電波天文バンド保護

勧告文書: ITU-R RA.769

勧告内容: 右表による

対策例

GMS: 保護フィルタ挿入

VISSR: 1681.6MHz

抑圧: 1660-1670MHz

COMETS: 周波数変更

22.65GHz → 20.7GHz

200W出力でフィルタ損傷回避

Radioastronomy band	Power flux-density (dB(W/m ²))	Spectral power-flux density (dB(W/(m ² Hz)))
13.36-13.41 MHz	-201	-248
25.55-26.70 MHz	-199	-249
73.0-74.6 MHz	-196	-258
150.05-153.0 MHz	-194	-259
322.0-328.6 MHz	-204	-258
406.1-410.0 MHz	-189	-255
608-614 MHz	-185	-253
1400-1427 MHz	-196	-255
1610.6-1613.8 MHz	-194	-238
1660-1670 MHz	-194	-251
2690-2700 MHz	-177	-247
4990-5000 MHz	-171	-241
10.6-10.7 GHz	-160	-240
15.35-15.4 GHz	-156	-233
22.1-22.5 GHz	-162	-233
23.6-24.0 GHz	-161	-233
31.3-31.8 GHz	-141	-228
42.5-43.5 GHz	-153	-227
86-92 GHz	-144	-222
105-116 GHz	-141	-222
164-168 GHz	-136	-216
182-185 GHz	-135	-216
217-231 GHz	-133	-215
265-275 GHz	-131	-213

RR/SFCG勧告等の制約事項とインパクト

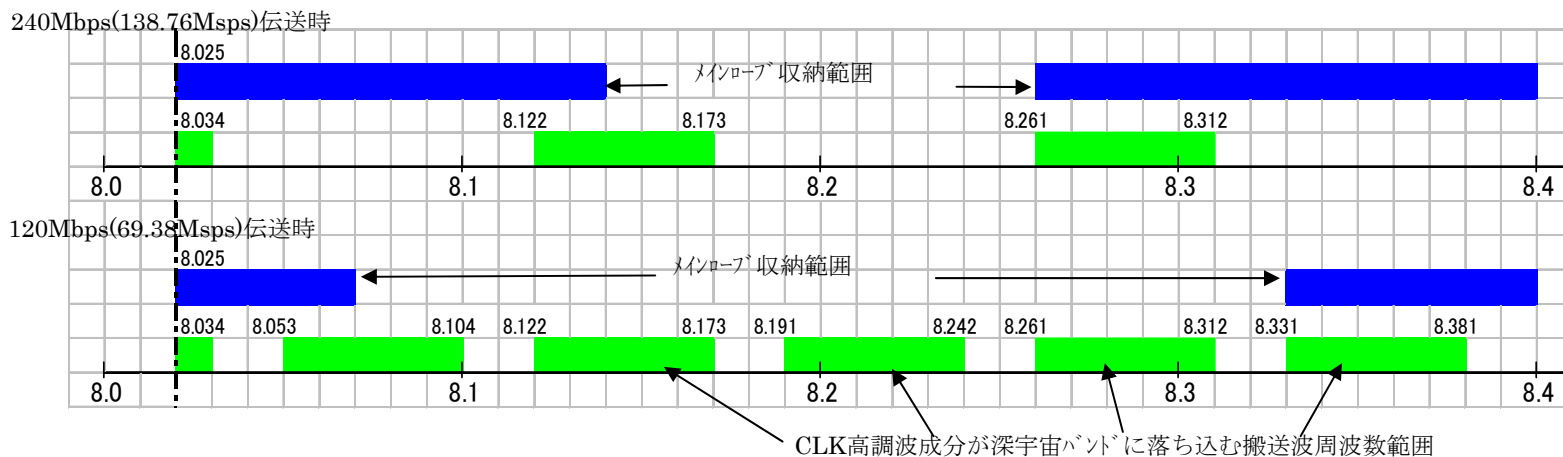
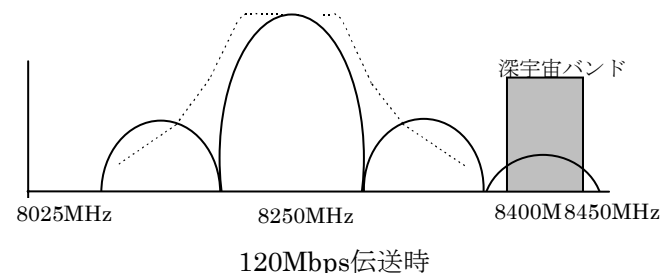
深宇宙業務バンド保護

勧告文書: ITU-R SA.1157

勧告内容:

周波数バンド (GHz)	最大電力密度 (dBW/Hz)	最大電力束密度 (dBW/m ² /Hz)
2.29 ~ 2.30	-222.5	-257.0
8.40 ~ 8.45	-220.9	-255.1
12.75 ~ 13.25	-220.5	-254.3
31.8 ~ 32.3	-217.3	-249.3

PFD規定に比べ100dB厳しい



通信システム構成と制約事項

干渉波の通信妨害への影響

干渉波の分類

- ・雑音性
- ・バースト性
- ・一様信号

影響／対策

- システム雑音温度の増加/信号抽出に障害
- バースト的に信号欠如(抑圧)
インターバでランダム化し誤り訂正により復帰
- 信号抑圧により回線品質低下

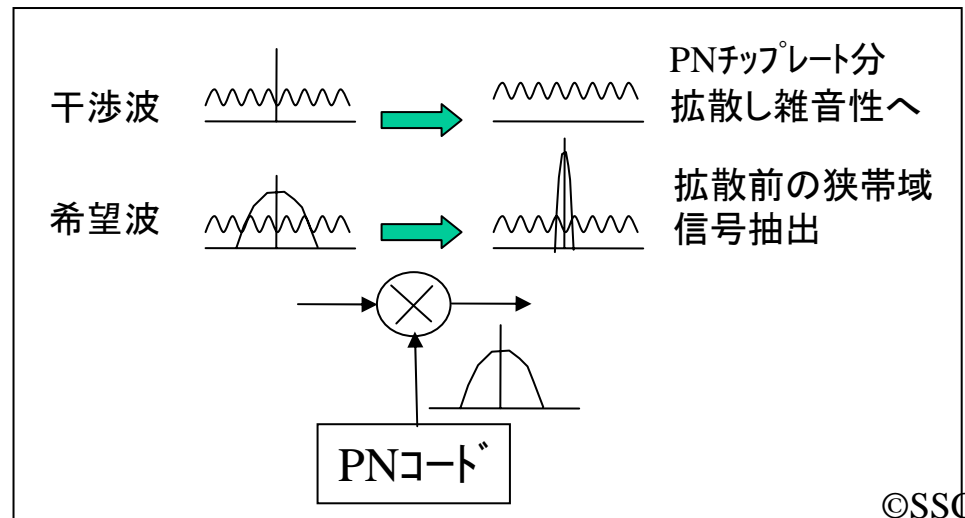
スペクトラム拡散と妨害波

復調過程の逆拡散により干渉波性質が変化

干渉軽減指数: 処理利得

処理利得 =

$$10 \times \log(\text{PNチップレート/ビットレート})$$



リンク形成上の留意事項

空間領域捕捉追尾

通信は双方のアンテナを正対させて初めて成り立つ。

- 捕捉時、双方のオフビーム損低下状態で信号検出が必要
通常初期捕捉オフビーム損は5~7dB程度が一般的
引き込み範囲はビーム幅の約1.6倍(経験値)が目安

- 捕捉時の推定誤差要因
 - 軌道決定に基づく位置推定精度
 - 姿勢決定精度による相対方位角予測精度
 - アライメント誤差、熱歪み誤差等製造上のバイアス値
 - ex: 周回衛星の指向方向予測精度 0.2~0.4deg (実績?)

- 捕捉範囲拡大対策：スキャンサーチ、捕捉アンテナ併用

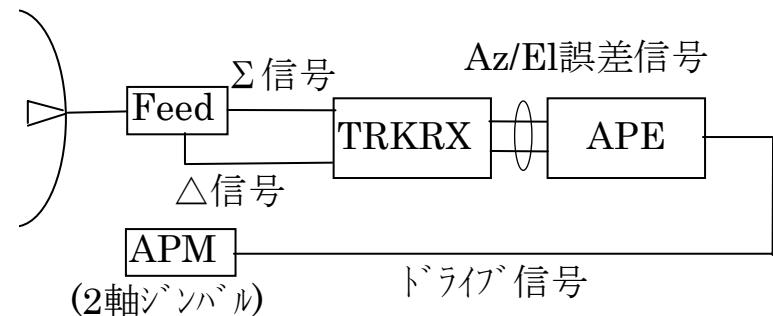
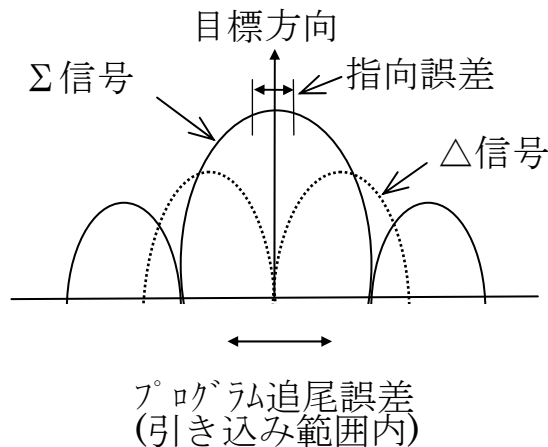
- 引き込み範囲外での自動追尾はサイドローブブロックや発散傾向を持つ

リンク形成上の留意事項

通信リンク形成

空間領域捕捉追尾 [アンテナ指向制御]

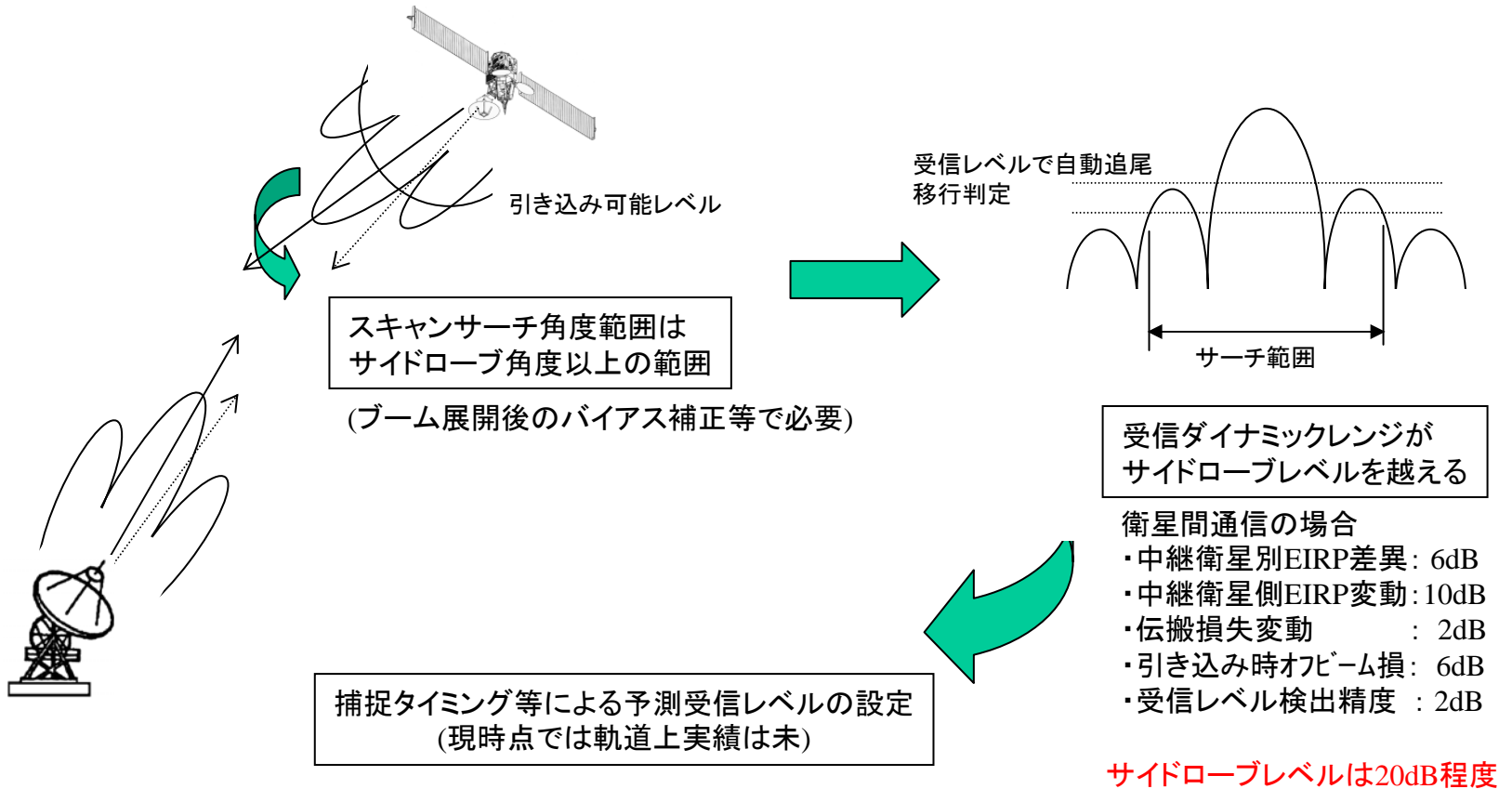
- ・ 軌道予報値に基づき目標方向へのアンテナ待ち受け&プログラム追尾
- ・ トラッキング用信号の引き込み
(通常、追跡管制局ではテレメトリ回線の残留搬送波使用)
- ・ 指向誤差収束制御によるアンテナ捕捉追尾



正対時の指向精度ガイドラインは、オフビーム損:0.2~0.5dB以内

リンク形成上の留意事項

空間領域捕捉追尾



スキャンサーチ時の対策

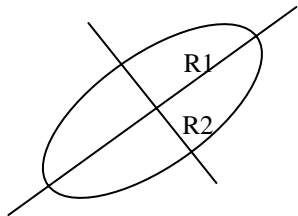
リンク形成上の留意事項

空間領域捕捉追尾

偏波と軸比

偏波の定義: 伝搬方向に向かって、ある一定場所の電界ベクトルが時間と共に変化する方向が時計(右)まわりを右旋偏波

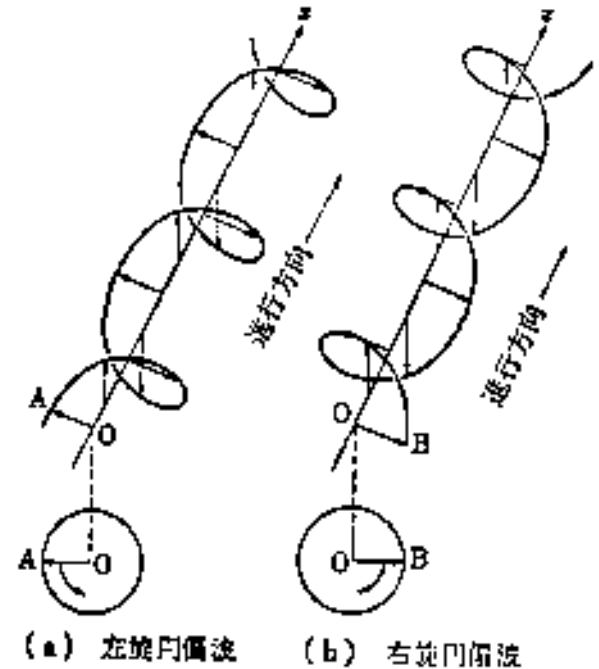
軸比(又は楕円偏波率): 電界強度の最大/最小強度比を、軸比とよぶ



軸比(真数): $r = R1/R2 = (E_L + E_R)/(E_L - E_R)$
 軸比 (dB): $\gamma = 20 \times \log(r)$

交差偏波識別度: 周波数有効利用のため、2偏波で別チャンネルの伝送が可能であるが、干渉防止のため高い交差偏波識別度が要求

交差偏波識別度(真数): $\rho = E_L/E_R$
 交差偏波識別度 (dB): $XPD = 10 \times \log(\rho)$



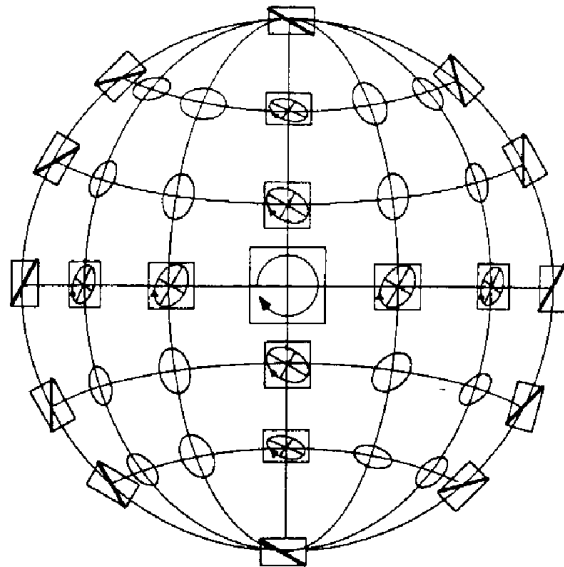
軸比:rと交差偏波識別度: ρ の関係

$$r = \frac{\rho + 1}{\rho - 1} \quad \rho = \frac{r + 1}{r - 1}$$

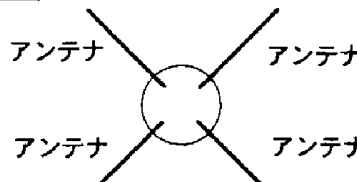
アンテナ特性の3要素

指向性: 電波を発射する方向の特性
 利得: 電波のエネルギーの強さの比
 偏波: 電波の電界が振動している方向

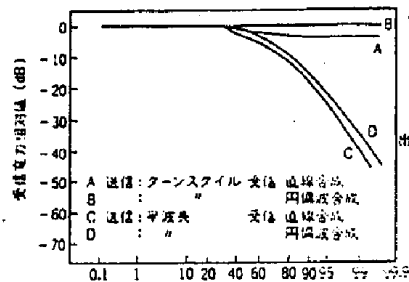
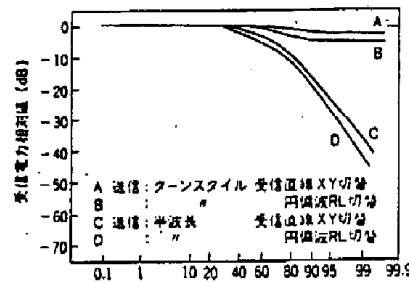
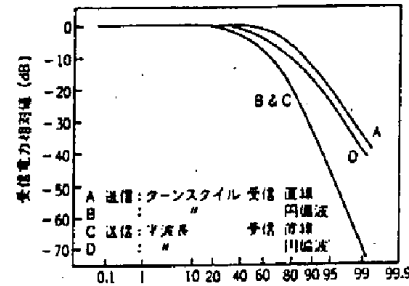
衛星のターンスタイルアンテナの偏波



衛星の上半分の偏波を示す。
 下半分では逆回りになる。



各種受信方式の受信電力の変動分布



リンク形成上の留意事項

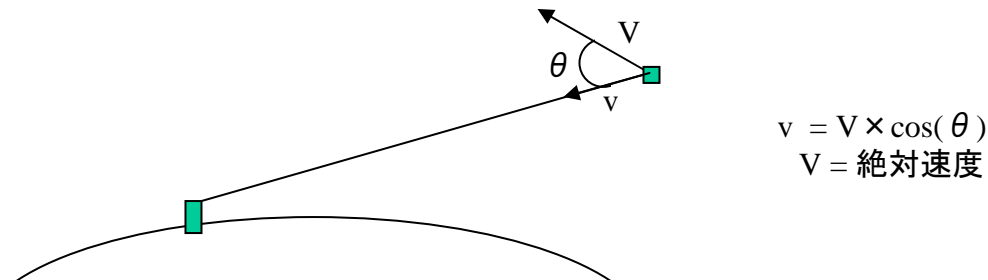
周波数領域捕捉追尾

周波数領域捕捉追尾の理解のためには回路動作の理解が必要

周波数捕捉範囲と追尾範囲

ドップラ周波数変移 : $\pm 30\text{ppm}$ (相対速度: 8km/sec max にて)

$fd = fc \times v/c$ @ fc =搬送波周波数、 v =相対速度、 c =光速



局発周波数安定度(偏差) : $\pm 10\text{ppm}$ 前後(初期設定+温度変動+ドリフト分)

相手局周波数安定度 : TBD

→通常、 $\pm 50\text{ppm}$ で捕捉範囲を十分カバー。

VCXO能力上は、 $\pm 100\text{ppm}$ 程度可能(捕捉時間との兼ね合い)

スペクトラム拡散波は、捕捉時間の長期化から捕捉範囲縮小に特別処置(ドップラ補償等)を施す必要有り

リンク形成上の留意事項

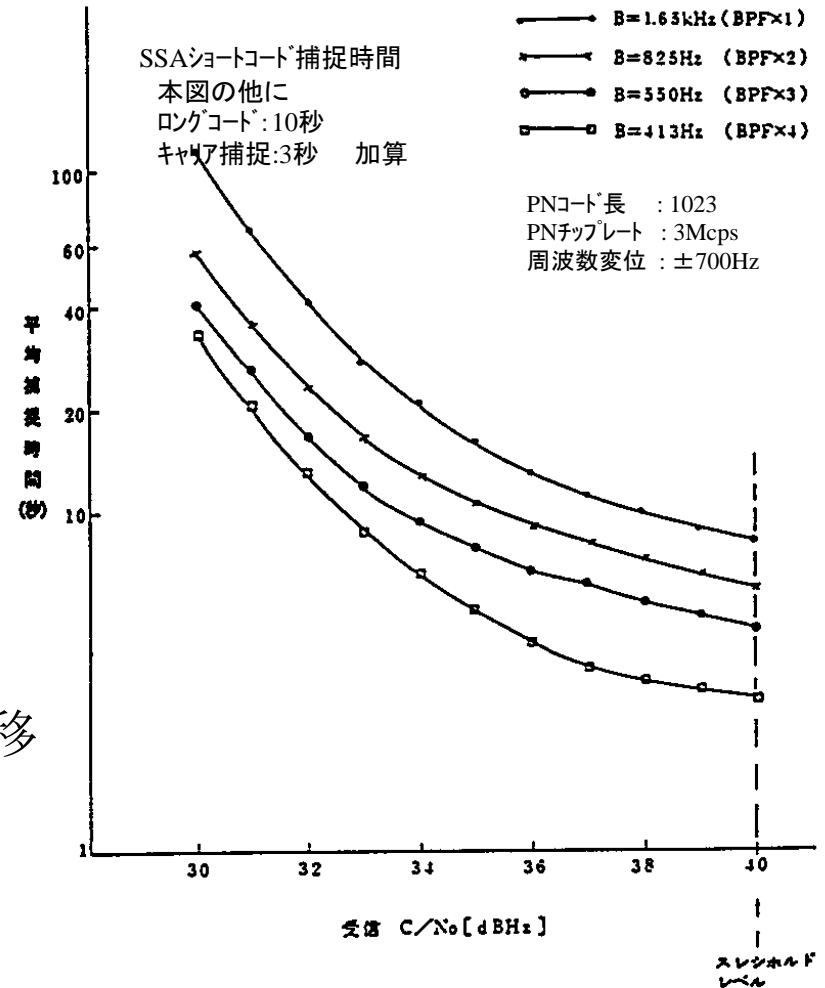
捕捉時間

1. スペクトラム拡散波の捕捉時間

- ・コード捕捉と周波数捕捉が必要
- ・コードは信号識別に必要、周波数を最適同期周波数に補正(ドップラ補償)
受信機待受周波数予測 : $\pm 700\text{Hz}$
軌道ダイナミクス補償 : $\pm 700\text{Hz}$
C/No = 34dBHz で捕捉時間: 35秒
(90%捕捉確率のため2回掃引前提)

2. スキャンサーチと捕捉時間

- ・基本的に、 $2\theta_B$ (3dB幅)内のビーム移動中に、周波数捕捉2掃引は必要。
このためには、周波数領域 捕捉時間は 数秒以内が望ましい。



通信信号品質 評価基準

通信信号品質の評価基準はビット誤り率(BER)

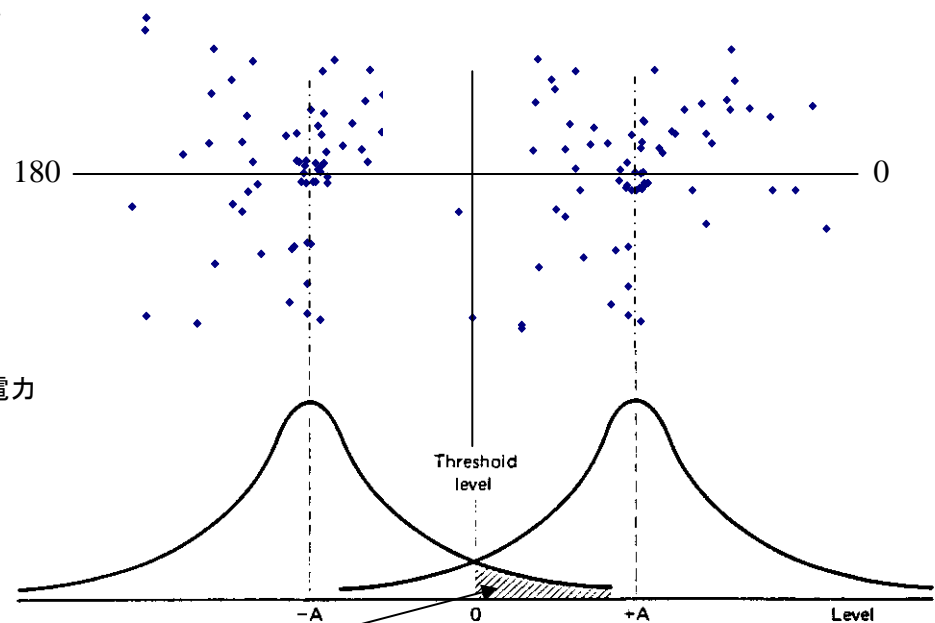
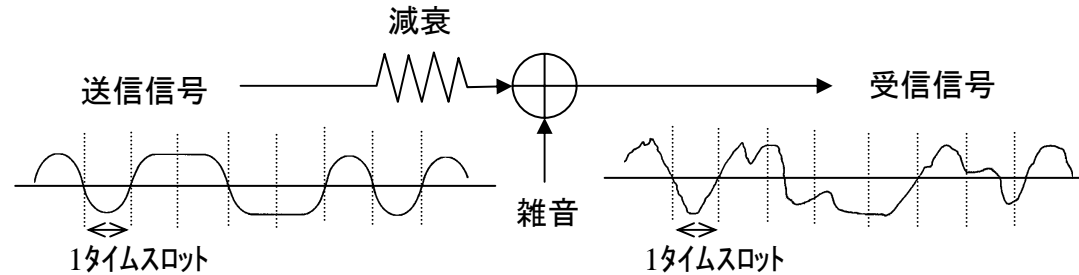
- 回線設計上は所定のBERを達成する上での余裕度(回線マージン)で評価
- 回線計算は信号強度と熱雑音との比(C/No)で評価
- デジタル変調波伝送においては、非線形伝送路やスペクトラム純度による信号品質劣化も考慮
- 多チャンネル伝送時は隣接チャンネル干渉も考慮

通信信号品質

ビット誤り率(BER)とEb/No

衛星通信では、

- ・伝送路が長いいため、極めて大きい減衰を受ける
(ex 1W送信出力で10⁻¹⁶W到達等)
- ・受信機前段に低雑音増幅器を配し、信号が雑音に埋もれない様設計。
- ・情報(1,0)識別基準としてbit誤り率(BER)を設定し、必要なC/Nを確保する。
- ・BERは、1bit当たりの信号エネルギー(Eb)と1Hz当たりの雑音電力(No)の比(Eb/No)で求まる。



$$E_b = \frac{C}{R} \quad N_0 = \frac{N}{B} \quad \text{より}$$

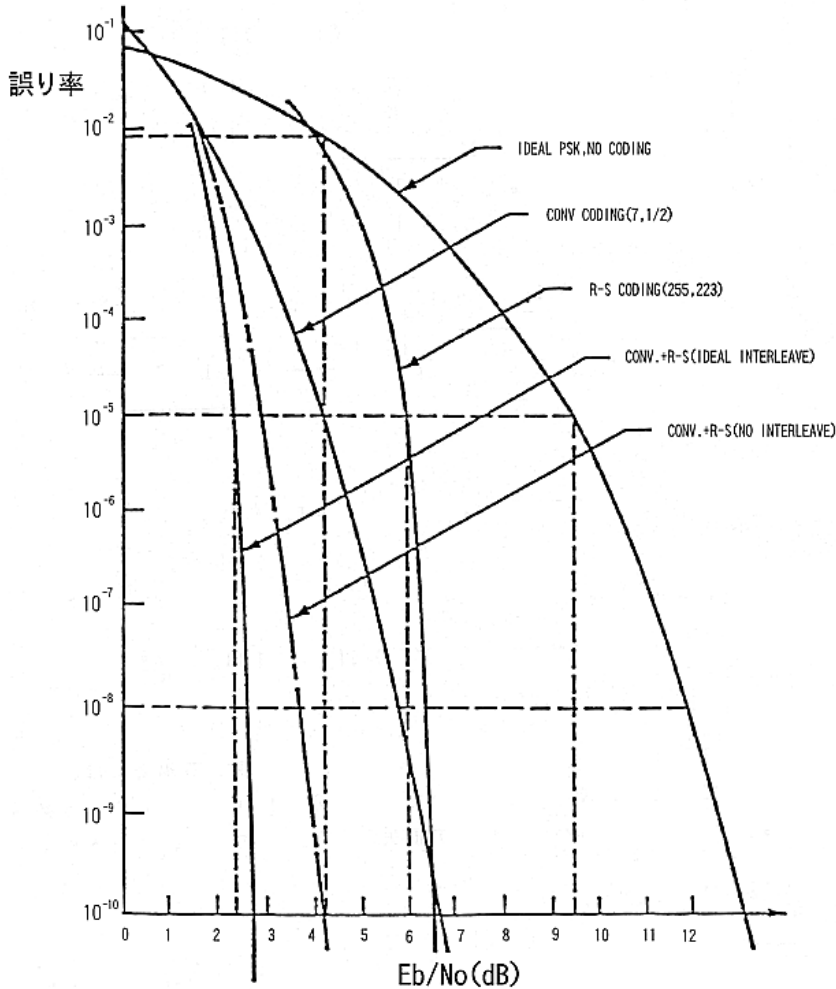
C: 信号電力
R: bit rate
B: 復調帯域
N: 復調帯域内雑音電力

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{R} \times \frac{B}{N} = \frac{C}{N} \times \frac{B}{R} \quad \text{であり、} B=R \text{ において}$$

$$E_b/N_0 = C/N \quad \text{が成り立つ}$$

$$P_e = 0.5 \operatorname{erfc}[\sqrt{E_b/N_0}] \doteq 1/2 \sqrt{\pi} \times \exp(-E_b/N_0) / \sqrt{E_b/N_0}$$

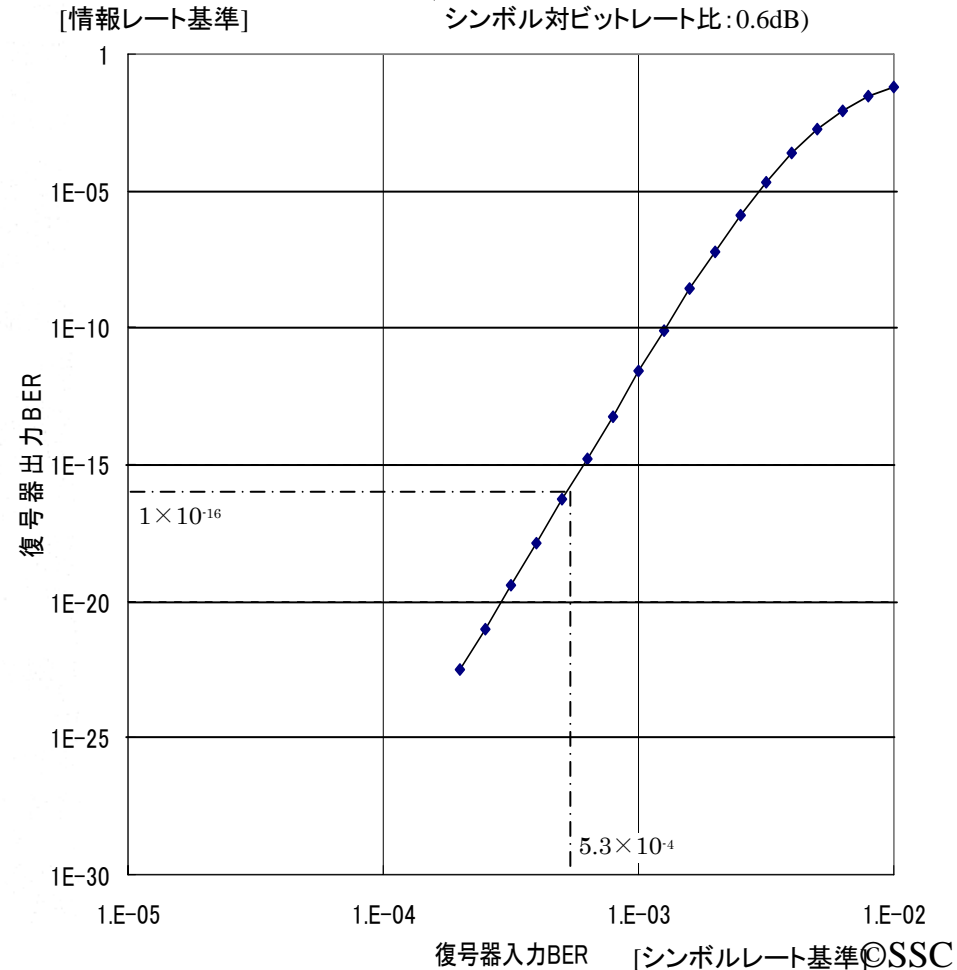
通信信号品質 ビット誤り率(BER)特性



BER特性 (符号化利得を含む)

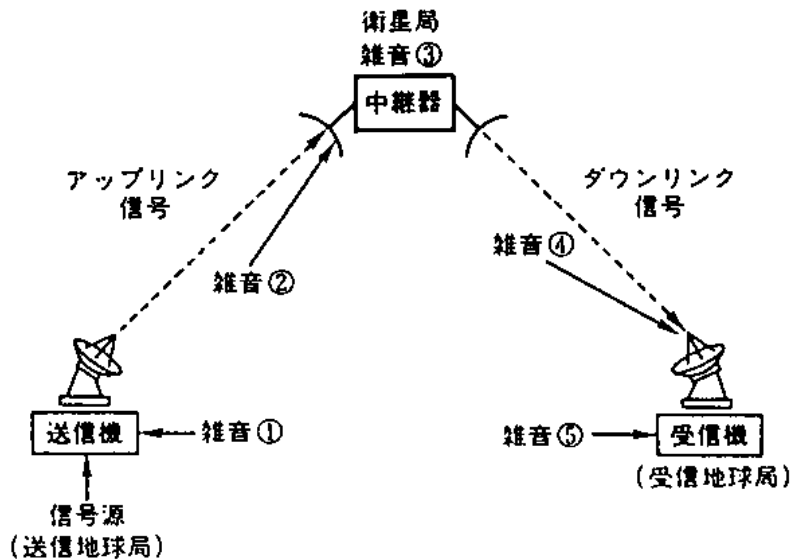
リードソロモン符号の誤り訂正能力

(CCSDS勧告/インタリーブ深さ:5における
シンボル対ビットレート比:0.6dB)



雑音の影響と対応

雑音の分類



雑音①: 信号源そのものに含まれる雑音
位相雑音の以外の熱雑音の影響は小さい

雑音②: 地上からの熱雑音、干渉雑音等

雑音③: 中継器で発生する雑音
初段LNAによる熱雑音、局発位相雑音等

雑音④: 天空雑音(銀河背景雑音)、大気雑音、地上の熱雑音の他、干渉雑音も混入

雑音⑤: 初段LNAによる熱雑音、局発位相雑音

雑音を大きく分類すると、熱雑音、位相雑音、干渉雑音に分けられる

雑音の影響と対応

熱雑音

受信信号に重畳する熱雑音(システム雑音温度: T_S 成分, 前頁の②+③ or ④+⑤)

$$\text{熱雑音電力密度} = K \times T_S \quad T_S = T_a + T_F \cdot (L-1) + L \cdot T_{RX} \quad (\text{規定点: アンテナ出力端})$$

ここで、 K = ボルツマン定数 (1.380×10^{-23} J/K, -228.6 dBW/K·Hz)

T_a = アンテナ雑音温度(アンテナから入射する雑音温度)

T_F = 給電部温度

L = 給電損失(真数)

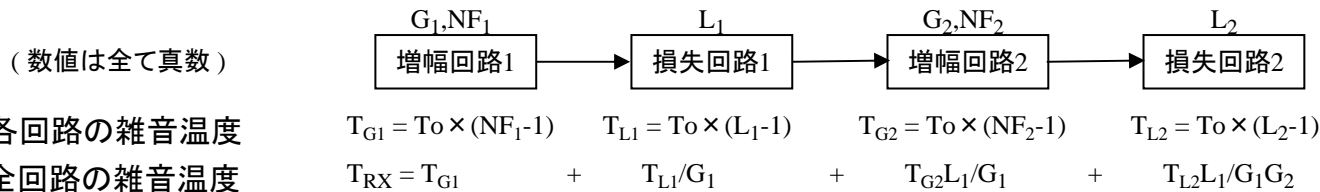
T_{RX} = 受信機の雑音温度

受信機の雑音温度: T_{RX}

低雑音増幅器(LNA)の雑音指数: NFと雑音温度

$$T_{RX} = T_o \times (NF-1) \quad T_o = 290K$$

低雑音増幅器(LNA)の後段を加味した雑音温度



通常、上記全回路の雑音温度から、装置全体のNFに換算。 G_1 が大きければ後段の影響は殆ど影響無し。

雑音の影響と対応

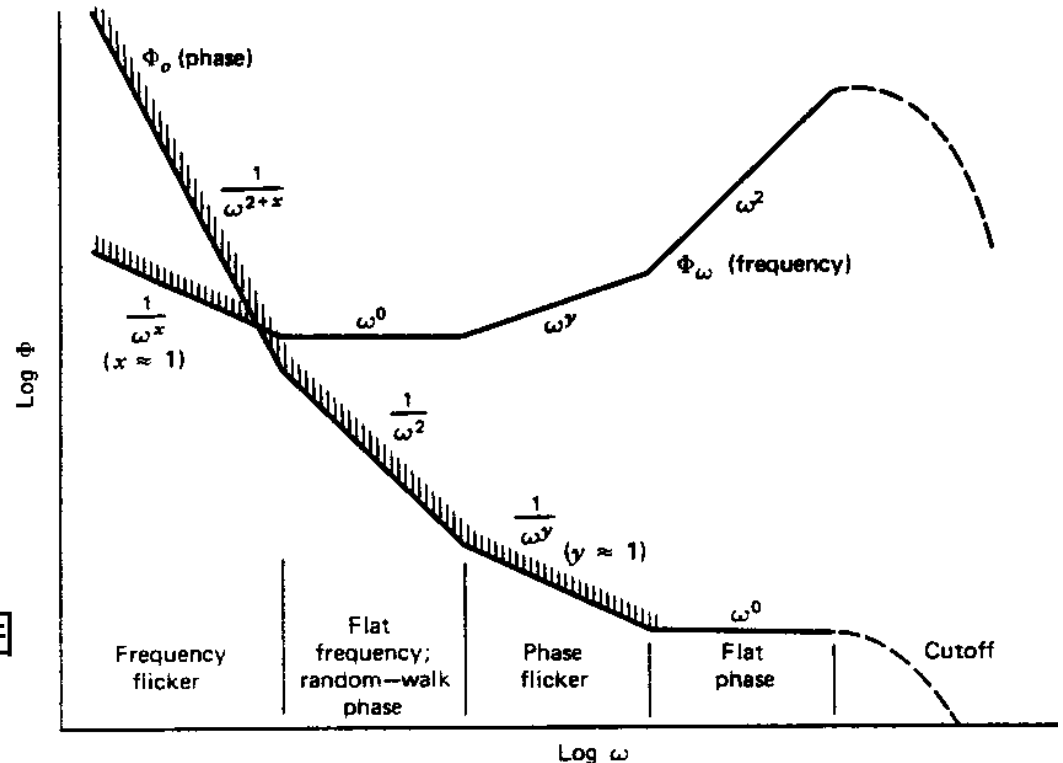
位相雑音

位相雑音は、発振器で発生する熱雑音が、発振周波数近傍に位相変調の形で重畳されて現れる。

位相雑音分布は、オフセット周波数に対して $1/f^3$, $1/f^2$, $1/f$ 特性を持ち、1MHz以内の特性がクリチカル。

伝送上留意すべき周波数範囲は、搬送波追尾系ループ帯域の $1/10 \sim$ 伝送レートの範囲

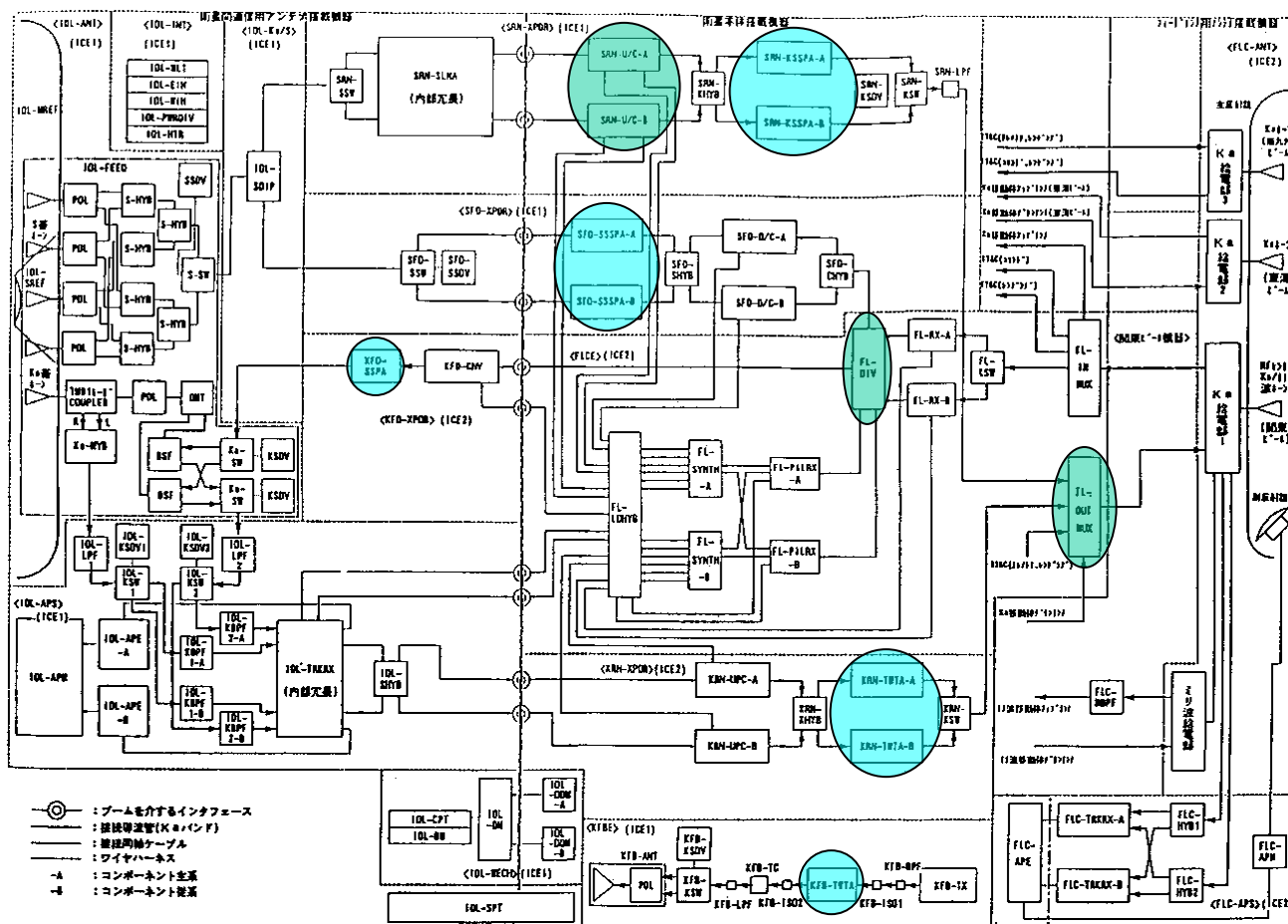
源信に用いる発振周波数は40～120MHz程度
Ka帯(30GHz)の局発信号生成には40～60dB劣化



伝送路による影響

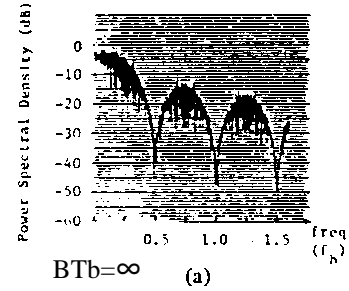
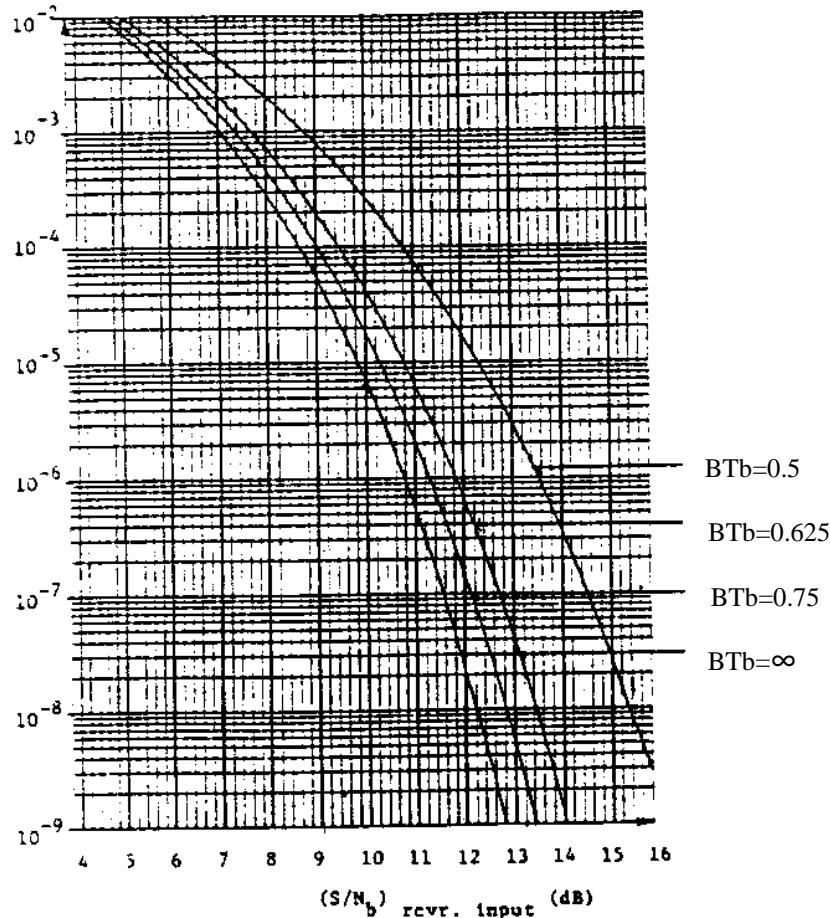
ミッション要求以外の制約から、伝送路には通信回線に影響を及ぼす要素が多数存在する。

- ・周波数共用の面から
帯域制限
- ・電力有効利用の面
から非線形増幅採用

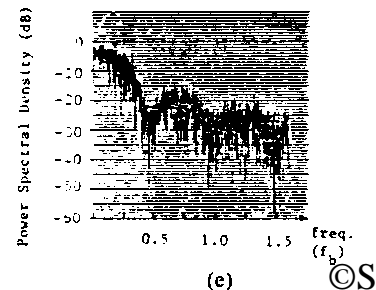
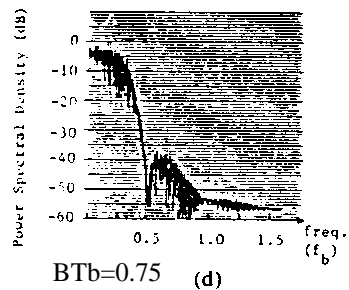
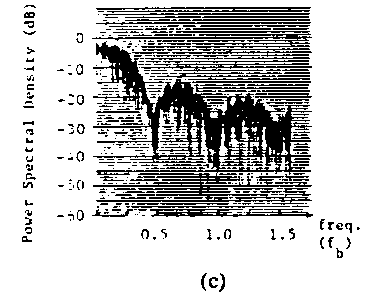
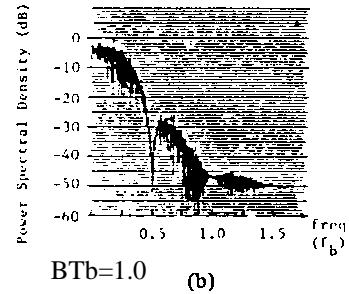


伝送路による影響 帯域制限

帯域制限：帯域制限することにより、シンボル間干渉による劣化

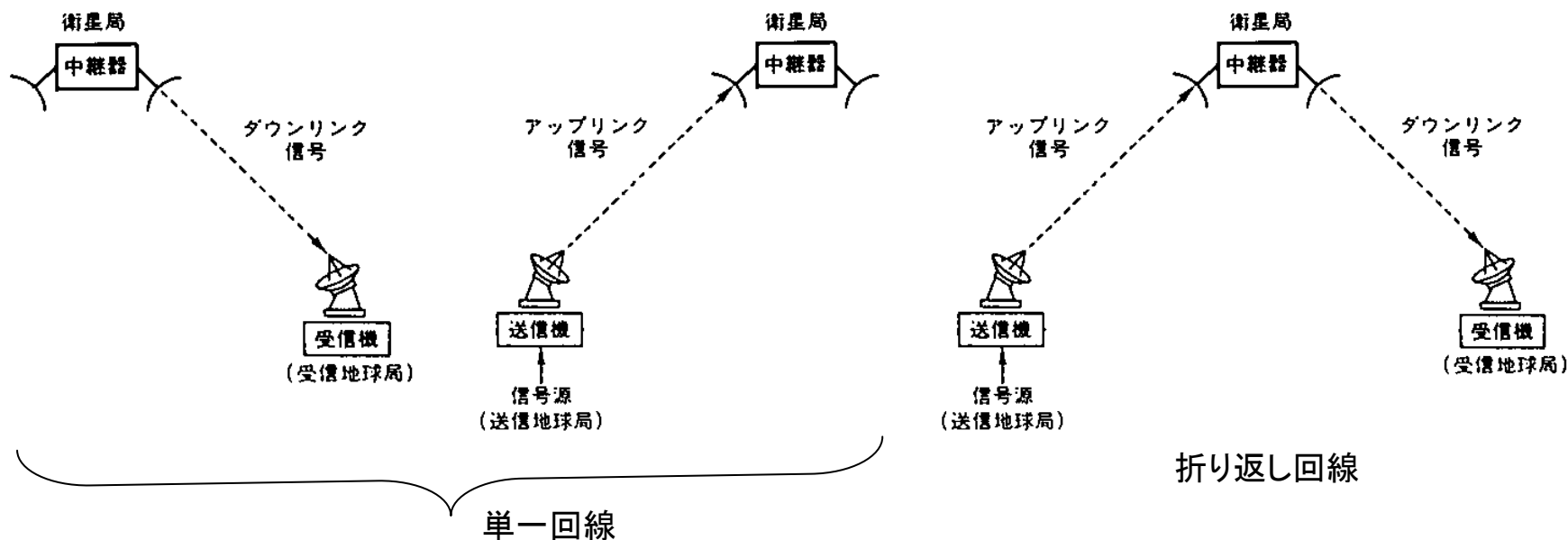


B = Prelimiter filter double-sided
3 dB bandwidth.
T_b = System unit bit duration.
Prelimiter filter: 4-pole Chebyshev,
0.1 dB ripple.



回線設計とハードウェア実現性

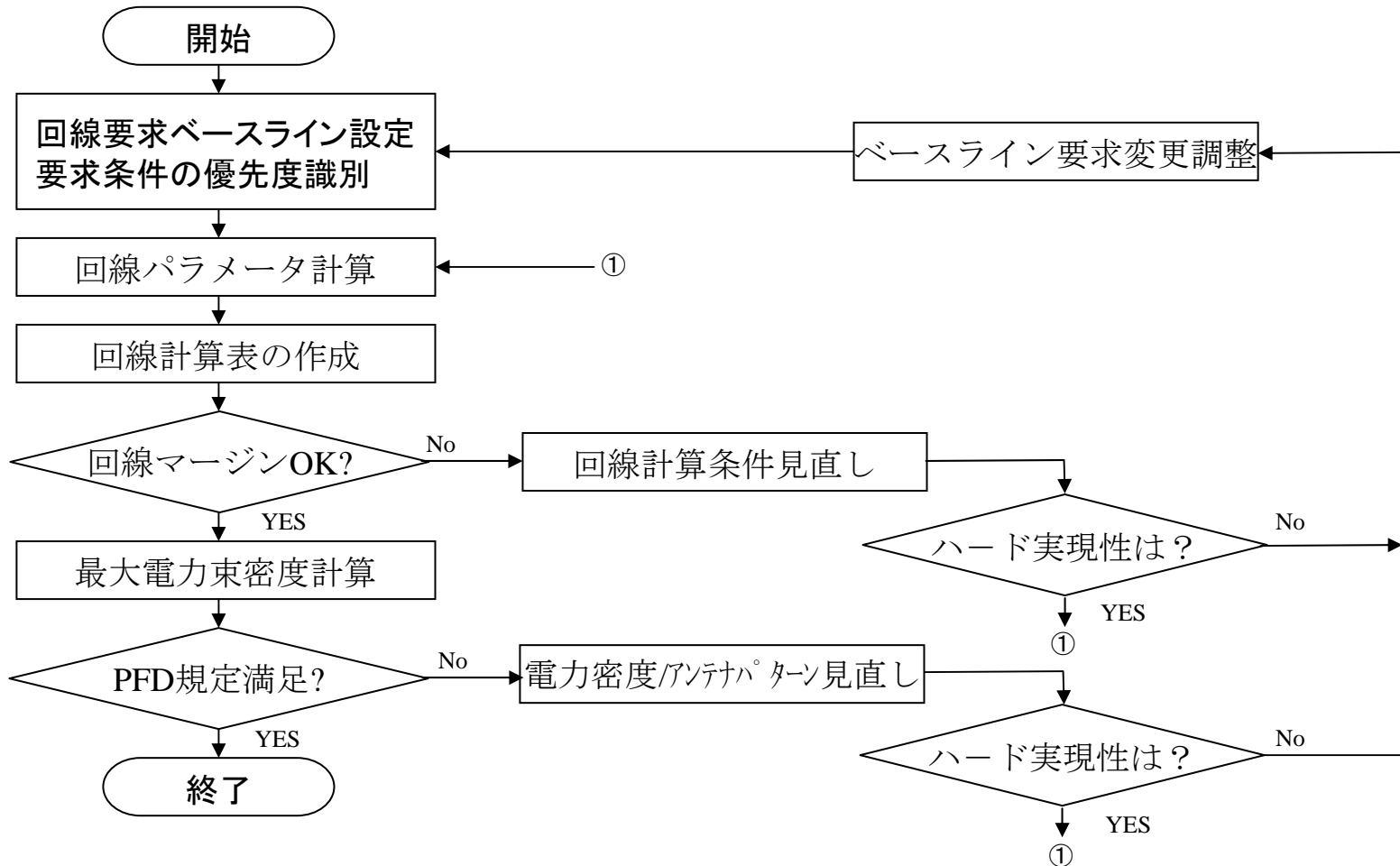
回線設計手順



折り返し回線の注意事項

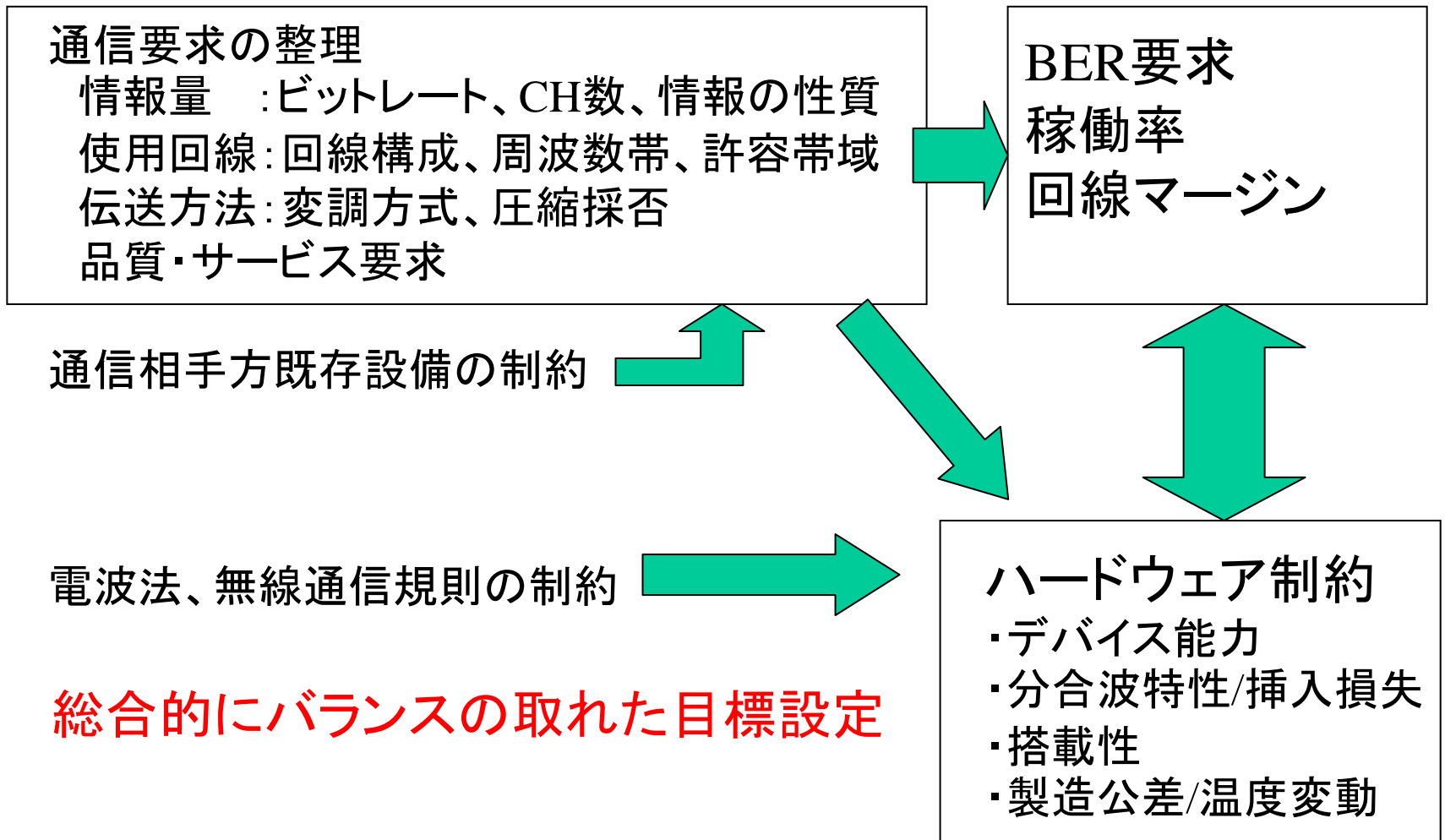
- ・ダウンリンクの送信電力は、中継信号の $(C+N)$ 総合電力になり、信号成分の電力が雑音で食われる。
- ・レベル制御(飽和出力、AGC増幅)の中継では、雑音との電力分配損失を計上する。線形増幅の場合は受信レベル+中継利得がダウンリンク送信電力になる。
- ・更に、アップリンクで付加される雑音と、ダウンリンクで付加される雑音を、総合C/Noとして加算する。
- ・ユーザ回線の負担を軽減するためには、アップ/ダウンリンクで通信能力にアンバランスが生じる。

回線設計手順 全体の流れ



回線設計とハードウェア実現性

回線計算評価基準の設定



回線計算評価基準の設定

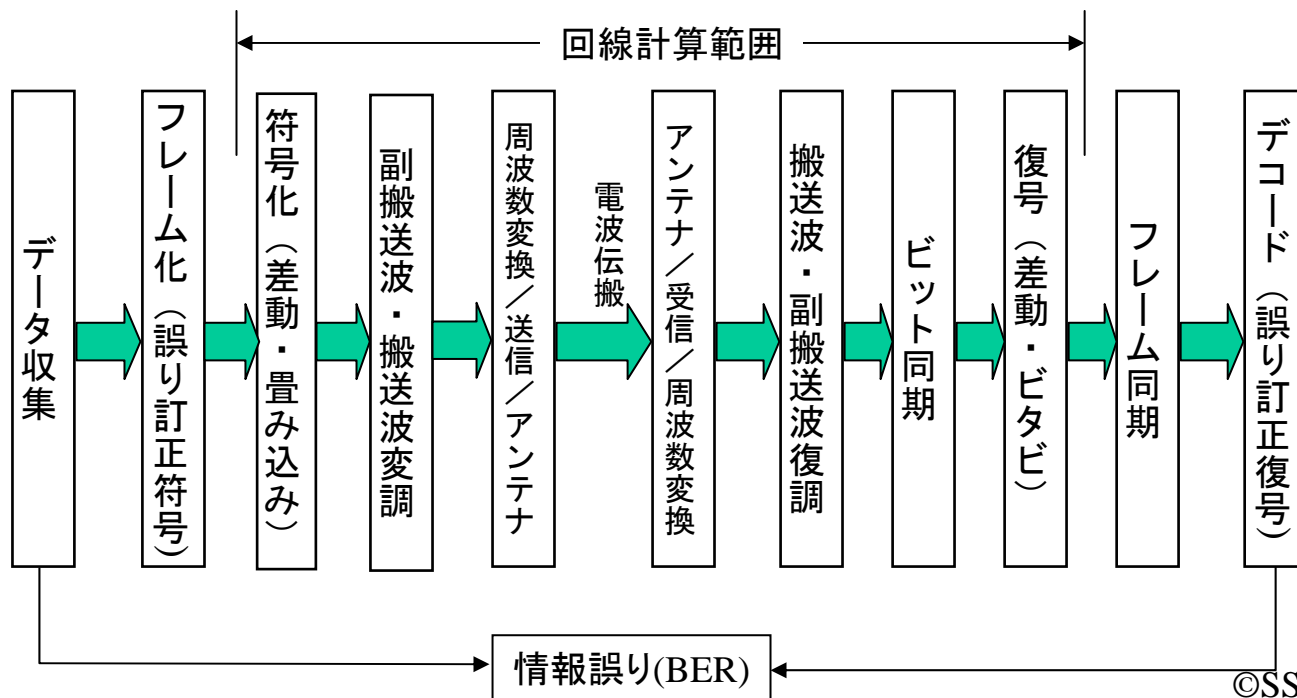
ビット誤り率

ビット誤り率(BER): 最終的なBER要求は、源情報に対する要求。
通信回線の評価は、ベースバンド抽出(内符号復号)まで。
回線評価基準を、誤り訂正能力を加味して設定必要。

HK運用のBER基準 : HKテレメトリ = 1×10^{-5} HKコマンド = 1×10^{-6} [従来実績等による]
画像データのBER要求 : ピクセルノイズの問題から 1×10^{-7} 要求
画像圧縮データは、1bitの重みが大きくなり、BER要求も高くなる。

BER要求の妥当性
新たな評価基準を設定するには、本来どこまで許容できるか吟味必要。
・1ブロックでの許容量 (時間率/画質等)
・データ取得再現性

通信回線へのBER要求は、 1×10^{-5} 程度が現実的



回線計算評価基準の設定

要求Eb/No

BERと要求Eb/No

現状の回線設計基準では、USB系/衛星間通信共に同期検波方式として、理論値から

TLM:BER<1×10⁻⁵でEb/No=9.6dB

CMD:BER<1×10⁻⁶でEb/No=10.5dB

をベースとし、差動符号(NRZ-S,M等)採用時には0.3dBを加算している。

厳密には、同期検波方式のBERは下式で求まる。

$$Pe = 0.5 \operatorname{erfc}[\sqrt{Eb/No}] \doteq 1/2\sqrt{\pi} \times \exp(-Eb/No)/\sqrt{Eb/No}$$

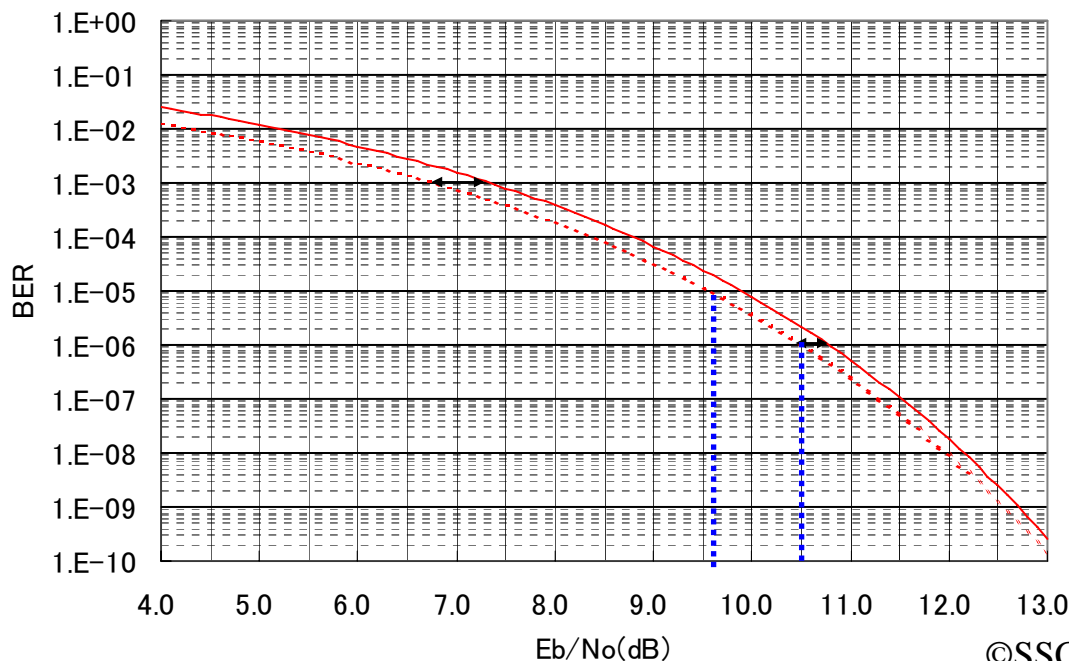
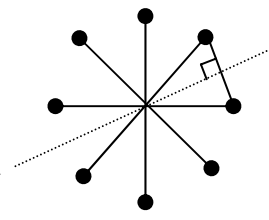
差動符号採用時の誤り率は、1bit前の誤りの影響を受けるため、

$$Pe' = Pe \times (1 - Pe)$$

で表され、誤り率が悪いほど差動符号による劣化も大きい。

8相PSKの場合には、ユークリッド間距離が短いため、判定しきい値が低くなり、要求Eb/Noは5.3dB高くなる。

$$\Delta = 20 \cdot \log \left\{ \frac{\sin(45^\circ / 2)}{\sin(90^\circ / 2)} \right\}$$



回線計算評価基準の設定

回線マージン

回線マージン

現状の回線設計基準において、下記をベースに開発されている。

USBコマンド :6dB	衛星間HKコマンド :3dB
USBテレメトリ:3dB	衛星間HKテレメトリ:3dB
USB測距 :1dB	衛星間測距 :1dB
ミッションデータ:衛星プロジェクト毎に設定	

軌道上検証結果は、
地上試験結果による
予測値と実測との差
は1dB以内。

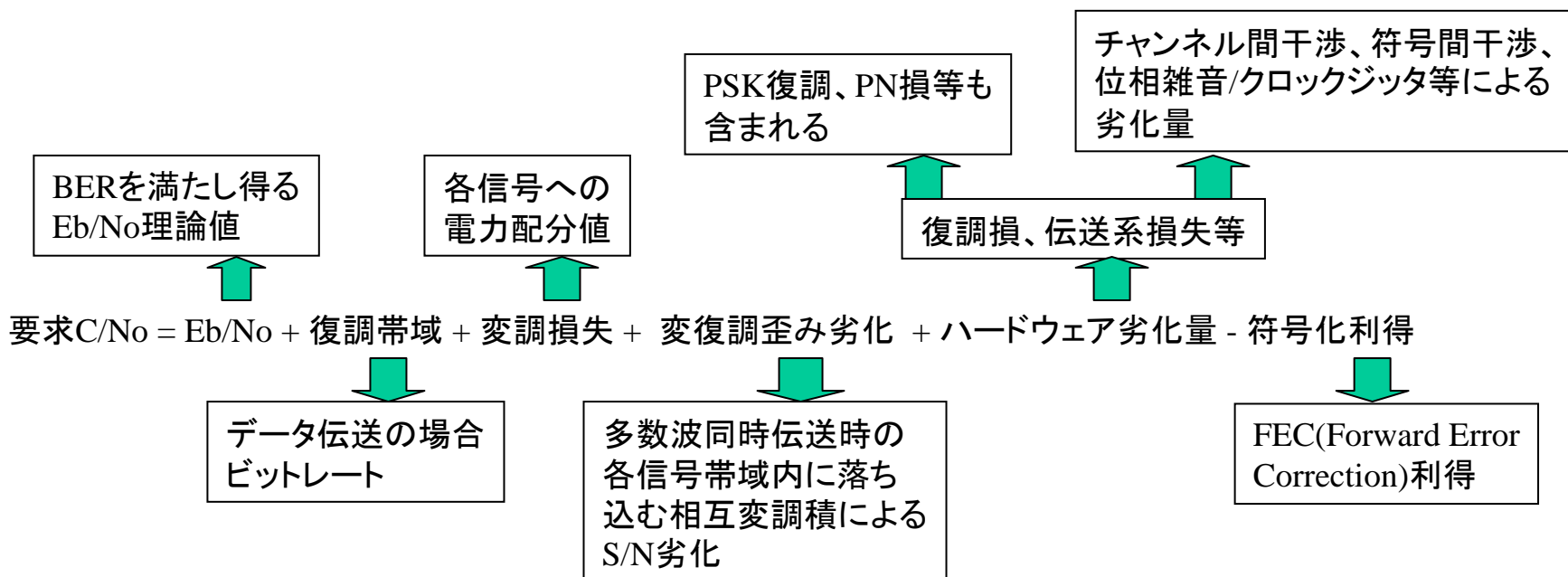
商用衛星等では、回線マージン>0dBで最大通信能力を提供。

晴天時の回線マージンを、降雨マージンとして構築するシステムもある。

回線マージンによるBER改善は必ずしも期待できず、切り離して考える必要がある。

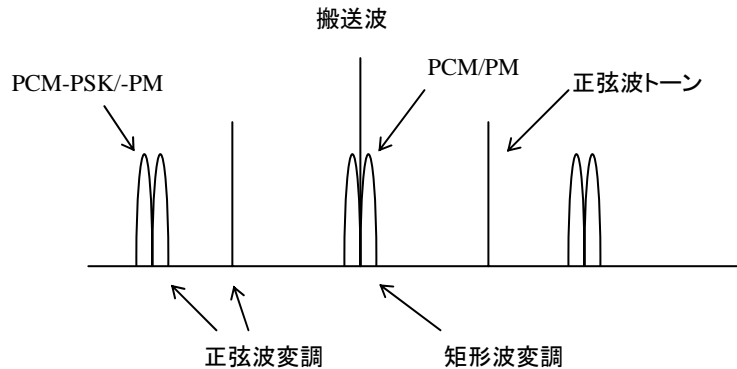
回線パラメータの計算 要求C/Noの算出

要求C/Noの算出



要求C/Noの算出 変調損失

変調損失の算出 (USB方式:PM変調)



多数波同時変調

- ・各信号に伝送するための電力を配分する。
- ・信号間で干渉しない様に周波数分離が必要。

ハード制約

- ・総合変調度は1.5rdo-p max
- ・各信号の変調度偏差は±10%程度

搬送波信号変調損失

$$M_c = -10 \cdot \log \left\{ \prod_{i=1}^N J_0^2(x_i) \cdot \prod_{j=1}^M \cos^2(y_j) \right\}$$

x_i : i 番目の正弦波信号位相変調度
 y_j : j 番目の矩形波信号位相変調度

正弦波信号変調損失 (n 番目の信号成分に対し)

$$M_s = -10 \cdot \log \left\{ \frac{2J_1^2(x_n)}{J_0^2(x_n)} \right\} + M_c$$

x_n : n 番目の正弦波信号位相変調度

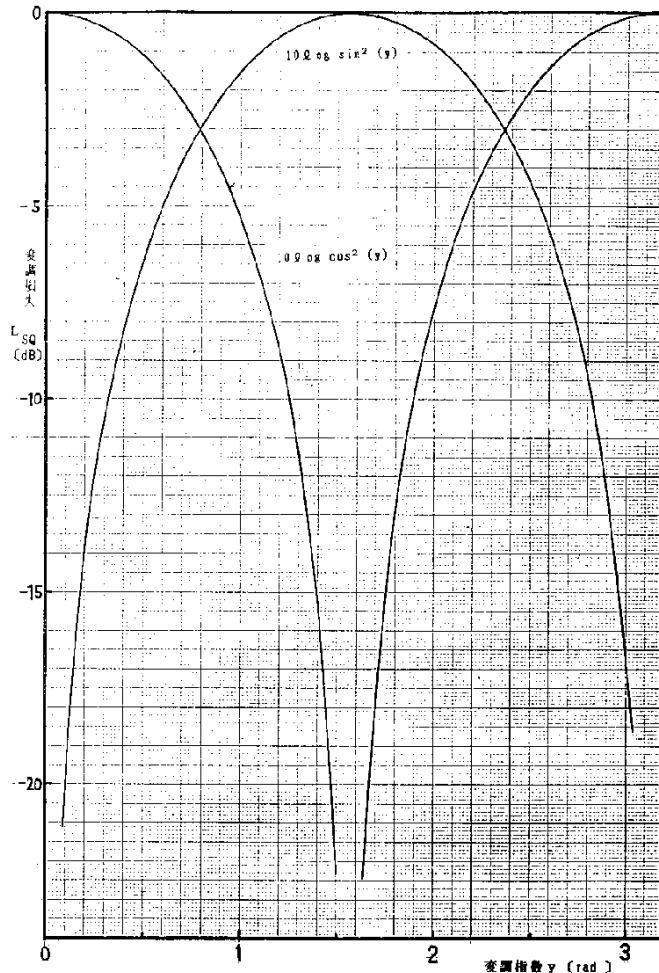
矩形波信号変調損失 (m 番目の信号成分に対し)

$$M_k = -10 \cdot \log \left\{ a \frac{\sin^2(y_m)}{\cos^2(y_m)} \right\} + M_c$$

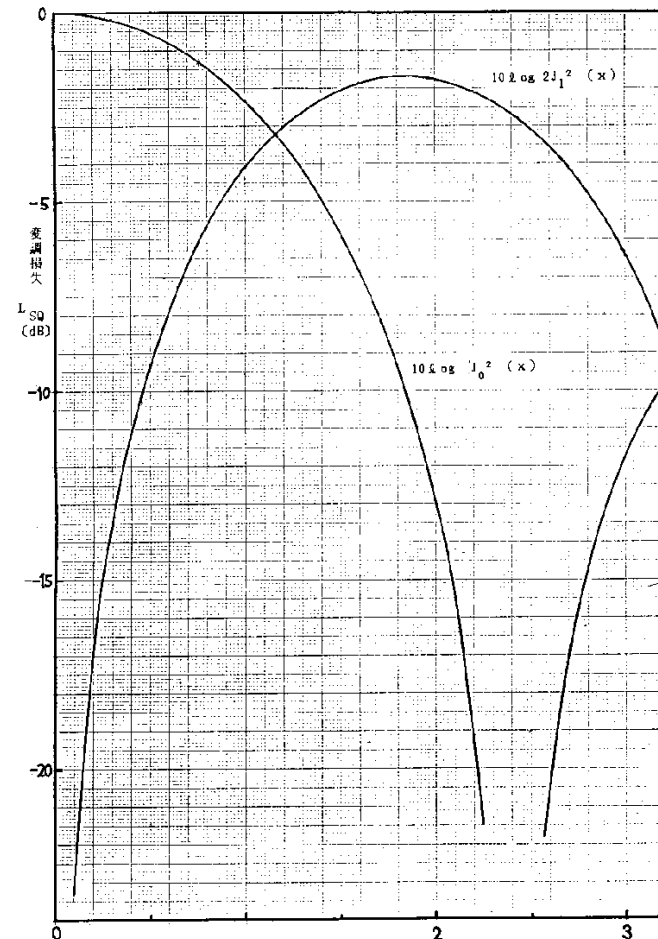
y_m : m 番目の矩形波信号位相変調度
 $a = 1$: ベースバンド矩形波信号を用いた場合
 $a = 8/\pi^2$: 矩形波サブキャリアをベースバンド矩形波信号で位相変調した信号を用いた場合

要求C/Noの算出 変調損失

変調度と変調損失の関係



変調指数対変調損失特性 (矩形波符号)



変調指数 x (rad)

要求C/Noの算出 ハードウェア損失

ハードウェア損失 (実績重視で設定)

現状の回線設計基準において、ハードウェア損失として提示されているものに以下のものがある。

USB系 PCM :2.4dB
PSK-PM:3.4dB

衛星間 データ :記載無し (復調フィルタ損:1dB程度、再生キャリア位相ジッタ:0.3dB程度)
算出例 2.5dB (USB系と同等)

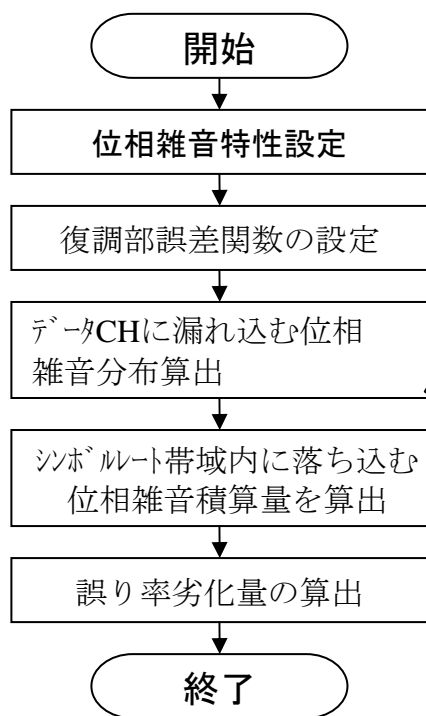
PN損 :記載無し 算出例 1.0dB (TDRS回線設計に準ずる)

伝送系損:記載無し 算出例 2.0dB (TDRSS SSAリンクのGround Terminal Implementation Loss
:4.87dBと同等を目標)

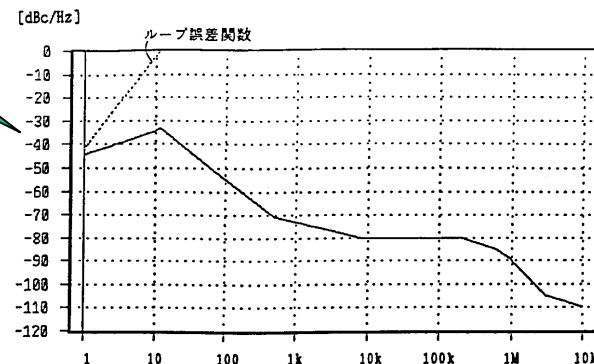
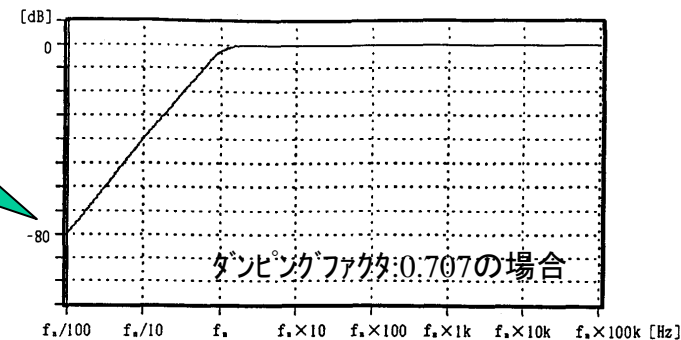
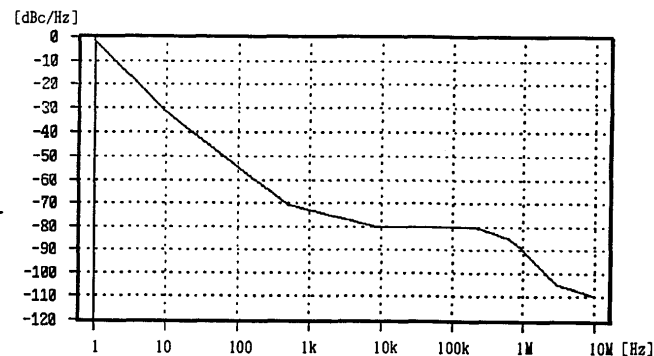
衛星間通信については、まだ実績データ蓄積が出来ないのが現状。

要求C/Noの算出 位相雑音による劣化

位相雑音による劣化



等価雑音帯域: $2BL$ から、
 $f_n = 0.15 \times (2BL)$ 計算



回線設計とハードウェア実現性

回線計算表の作成

下表は、要求C/No算出表で、多信号を同時に伝送する時は、各信号の要求C/Noが均等になる様に配慮する。(回線マージンのバラツキを縮小するため)

No.	項目	単位	設計値					備考
1	信号種別	—						
2	変調方式	—						
3	要求Eb / No 又はS / N	dB						
4	変復調歪みによる劣化量	dB						
5	ハードウェア劣化量	dB						
6	符号化利得	dB						
7	ビットレート 又は帯域幅	dBHz						
8	変調損失又は信号分配損失 (前提値) 変調度	dB rad						
9	要求C / No	dBHz						
10	回線マージン	dB						

(要求C / No 算出表では利得には負の記号を付ける。)

回線パラメータの計算 受信C/Noの算出

受信C/Noの算出

中継回線の場合、ダウンリンク
には、電力分配損失を考慮

フェージング、マルチパス、シンチレーション、
ファラデーローテーション等があるが、特殊な
条件の場合であり、通常は不要。

$$\text{受信C/No} = \text{送信EIRP} - \text{自由空間損失} - \text{偏波損失} - \text{大気吸収損失} - \text{降雨損失} - \text{各種損失}$$

$$+ \text{受信G/T} - \text{ボルツマン定数}$$

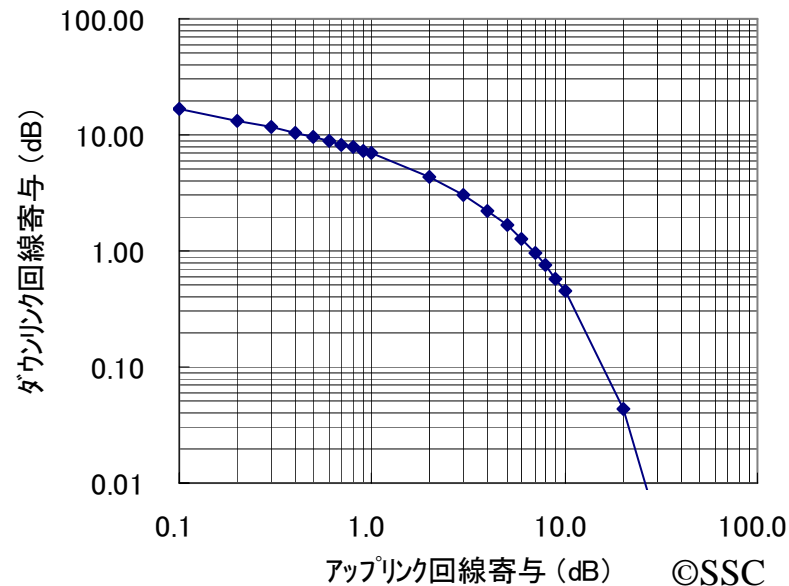
この式の場合、アンテナポイン
ティング損失が含まれる。

ダウンリンクにおいて、降雨減衰
による天空雑音増加によるG/T
低下分を考慮。

中継回線の場合、アップリンク/ダウンリンク各々受信C/Noを
算出し、下式にて総合C/Noを求める。

$$\text{総合C/No} = -10 \cdot \log (10^{-0.1 \cdot (\text{C/No})_u} + 10^{-0.1 \cdot (\text{C/No})_d})$$

各回線寄与率を右図に示す。



受信C/Noの算出

送信性能と受信性能

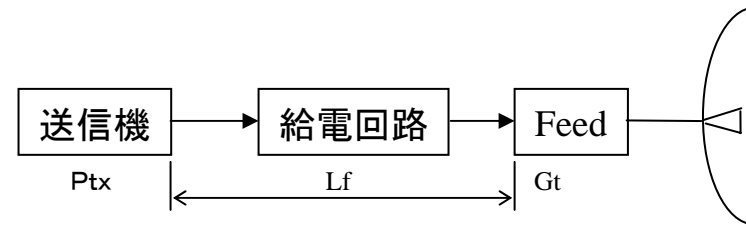
送信性能：送信側の性能指標として、送信アンテナからの実効放射電力(EIRP)を用いる。
指向ずれによるポインティング損を含む場合と別計上にする場合がある。

$$EIRP = P_{tx} - L_f + G_t$$

P_{tx} :送信電力(dBW)

L_f :給電系損失(dB)

G_t :アンテナ利得(dBi)



受信性能：受信側の性能指標として、アンテナ利得(G_r)とシステム雑音温度(T_s)との比
受信G/T (G_r/T_s)を用いる。規定点によって算出式が若干異なる。

$$G/T = G_r - L_f - T_s$$

T_s = システム雑音温度

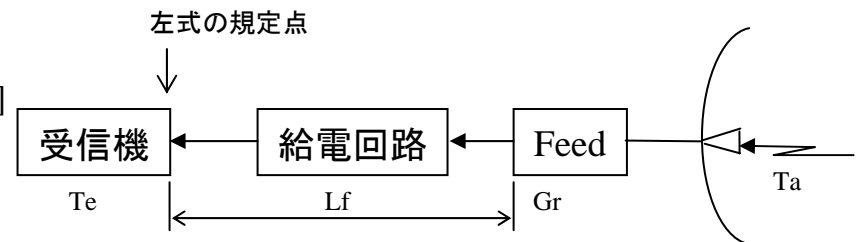
$$= 10 \times \log [T_a / 10^{(L_f/10)} + T_f \times (1 - 10^{-(L_f/10)}) + T_e]$$

T_a = アンテナ雑音温度(地球方向:300K)

宇宙空間とのHYB合成の場合は積分算出

T_f = 給電線温度(動作温度の最高温度使用 単位:K)

T_e = 受信機雑音温度 = $(10^{(N_f/10)} - 1) \times 290$



受信雑音電力密度(N_o)は、 $K \cdot T_s$ で求まる。(K:ボルツマン定数)

地上局の受信G/Tは、晴天時の性能であり、雨天時には天空雑音が増加する。

受信C/Noの算出 送信性能と受信性能

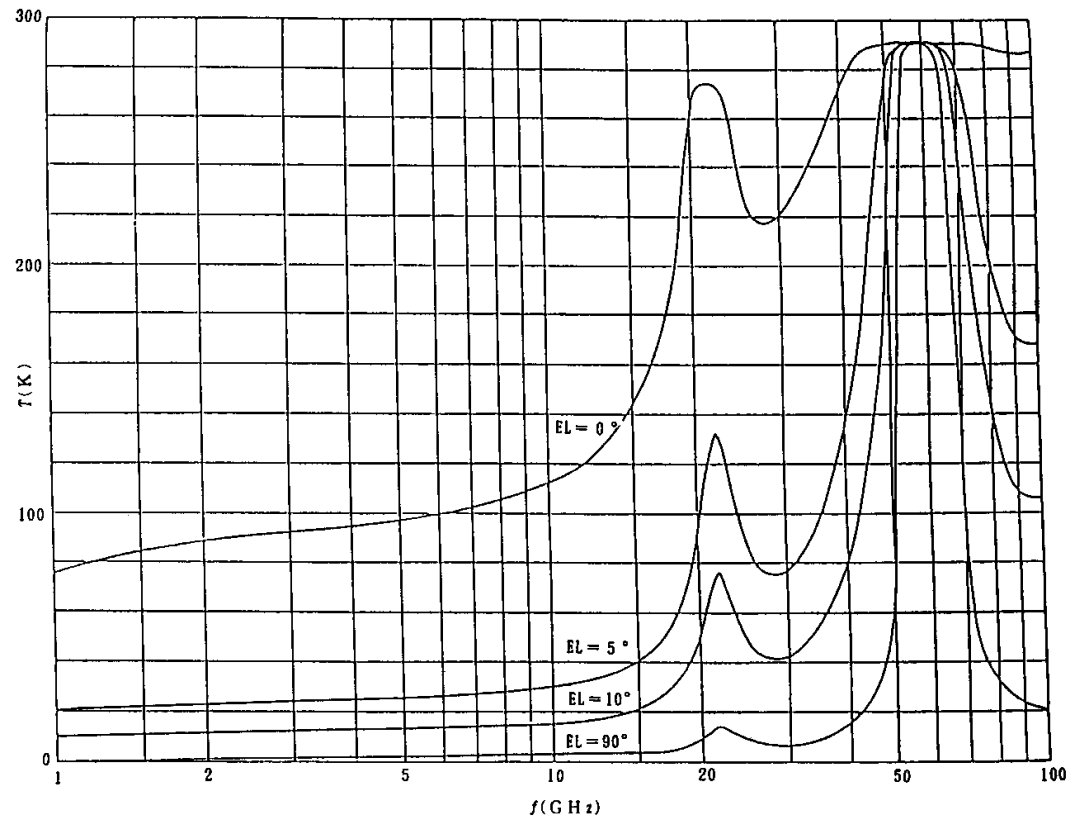
アンテナ雑音温度 (地上局)

地球局の場合のアンテナ雑音温度は、晴天時の受信G/Tに使用され、大気ガスの吸収に起因する。
大気吸収損失:Laを用いて、下式により求める。

$$T_a = T_m \left\{ 1 - 10^{-La/10} \right\}$$

$$T_m = 1.12T_G - 50 \text{ [K]} \quad T_G = \text{地表の温度}$$

標準的大気モデルにおける、天空雑音温度の周波数特性の1例を右図に示す。



天空雑音温度 (晴天時)

気圧: 1 気圧
温度: 20°C
水蒸気密度: 3 g/m³
EL: 仰角

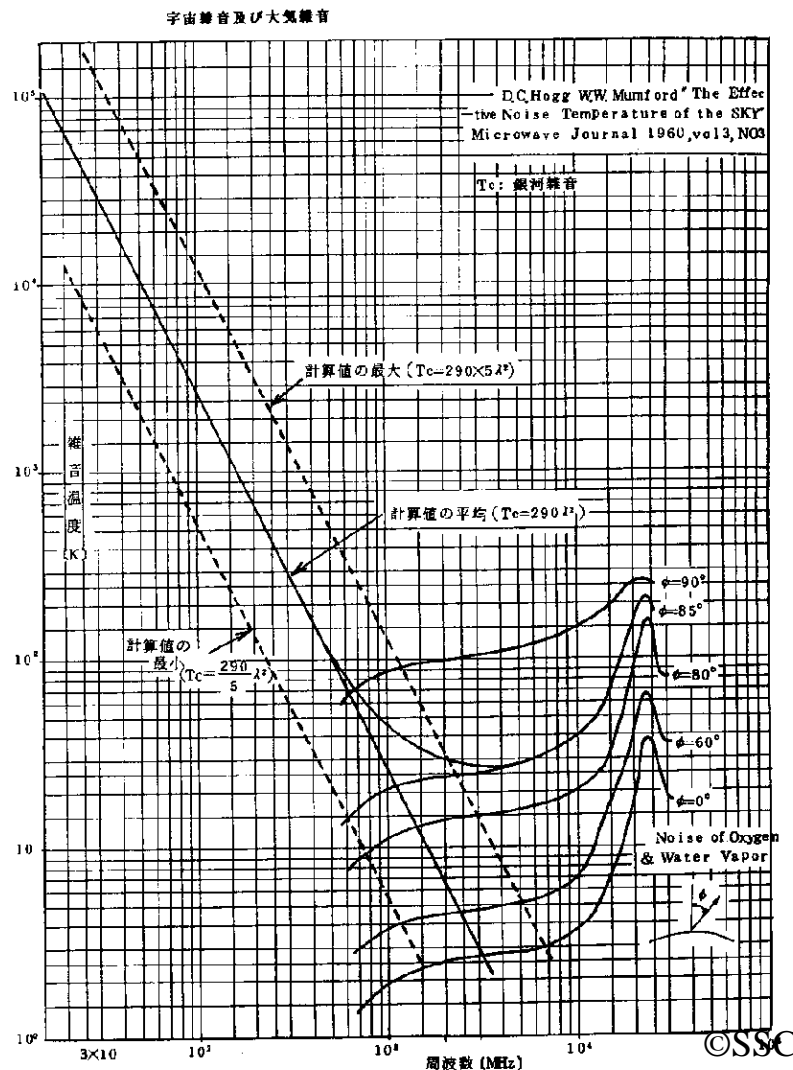
出典: C C I R R e p . 7 2 0 (1978)

受信C/Noの算出 送信性能と受信性能

アンテナ雑音温度 (宇宙機)

- ・宇宙機のアンテナ雑音温度の内、地球方向のみ指向する場合には、300Kを使用する。
- ・オムニアンテナで地球方向と反地球方向をHYB合成して使用する場合には、球面全体から入射する雑音温度を積算するのが厳密解である。この場合の宇宙雑音については、右図が回線設計基準で示されており、2GHz以上の周波数では極めて小さく、地球からの雑音温度の約半分が入射すると考えても差し支えない。(150K)
- ・衛星間通信で追尾アンテナを使用する場合には、殆どの時間は銀河方向で使用するが、地球エッジでのAOS,LOS時点では、地球方向からの雑音が入射することになる。
- ・太陽による雑音についても考慮する。

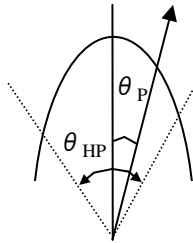
周波数(MHz)	雑音温度(K)
100	1.00E+06
200	9.00E+05
300	7.00E+05
600	4.60E+05
1000	3.60E+05
3000	6.50E+04
10000	1.10E+04



受信C/Noの算出

送受信アンテナに係わる損失

ポインティング損失：送受信アンテナの通信相手方向とのずれに基づく損失。
指向性アンテナ使用時のみ考慮（無指向性アンテナは利得で考慮）



$$L_{AP} = 20 \cdot \log \left\{ \exp \left\{ \frac{K^2 \cdot \theta_P^2}{\theta_{HP}^2} \right\} \right\}$$

$$K^2 = 2 \cdot \ln 2$$

θ_P = 指向誤差 (deg)

θ_{HP} = 電力半値幅 (deg)

偏波損失：送受信アンテナの軸比のずれに基づく損失。

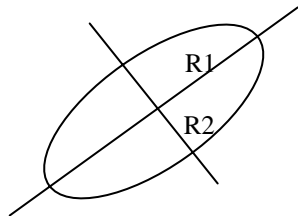
回線設計基準では、

直線－直線： $L_p = 10 \cdot \log (1/\cos^2 \theta)$

直線－円： $L_p = 3\text{dB}$

円－直線： $L_p = 3\text{dB}$

楕円－楕円： 下式による



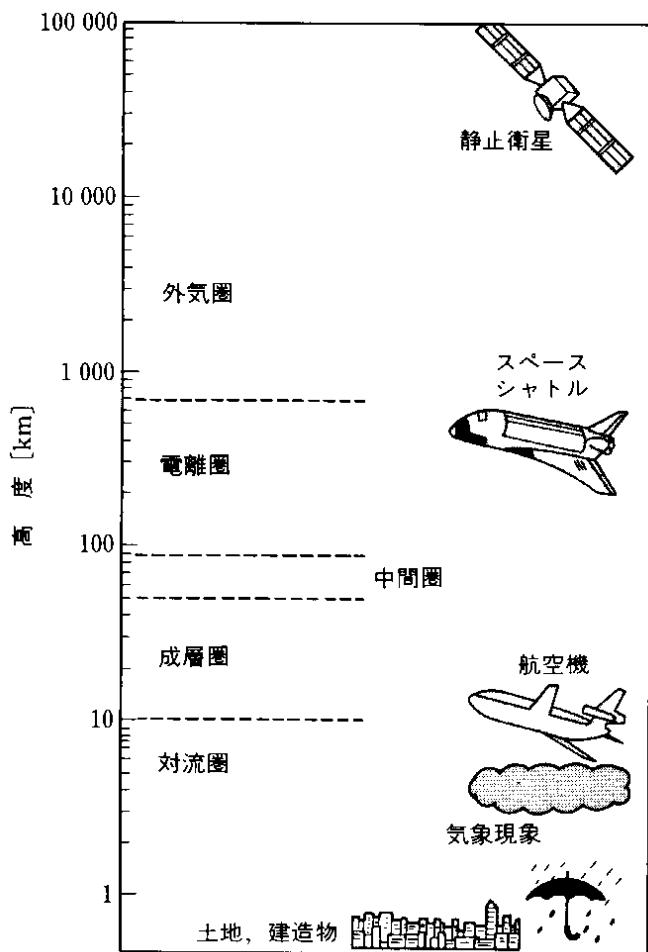
$$L_p = 10 \times \log [(R_1^2 + 1)(R_2^2 + 1) / ((R_1 R_2 + 1)^2 \times \cos^2 \theta + (R_1 + R_2)^2 \times \sin^2 \theta)]$$

R_1, R_2 = 送信/受信アンテナの楕円偏波率 = $10^{(X/20)}$

θ = 到来波と受信アンテナの軸のずれ角

直線－円の組み合わせにおいて、円偏波側にも軸比があり、一律 3dBとは言えない

受信C/Noの算出 電波伝搬上の影響



衛星通信と主な電波伝搬現象

原因	現象	概要	対策	影響を受けるシステム
電離圏	シンチレーション 到来角変動	受信振幅の短周期変動 電波到来角短周期変動	マージン付加	1GHz 程度 以下の衛星 通信
	ファラデー回転	直線偏波の偏波面回転	偏波追尾 円偏波使用	
対流圏	大気ガスによる減衰	大気を構成するガスによる電波の吸収	マージン付加	10 GHz 程 度以上の衛星 通信
	降水粒子による減衰	降雨、雪などによる電波の散乱・吸収	マージン付加 電力制御など	
	吸収減衰に伴う雑音増	電波の吸収に伴って再放射される雑音増加	マージン付加	
	異方性粒子による 交差偏波識別度の 劣化	降雨、雪、上層の氷による電波の偏波状態 の変化（直交偏波共用回線の干渉が増加す る）	交差偏波補償	1GHz以上 の衛星通信 （変調方式 にも依存）
	ダクト・降雨散乱 による干渉増	温度逆転層や降雨散乱により非希望電波が 干渉電波として混入	調整距離の設 定	
地物	シンチレーション 到来角変動 拡散・発散減衰	受信振幅の短周期変動 電波到来角短周期変動 屈折率の非一様性に起因する	マージン付加 一般に影響は 少ない	低仰角の衛 星通信
	シャドウィング	移動体通信で植生、建造物による電波の遮 へい	—	低仰角の固 定衛星通信 や移動体衛 星通信
	フェージング	大地、建造物からの反射に起因する振幅の 短周期変動	マージン付加 ダイバーシチ	

受信C/Noの算出 電波伝搬上の影響

自由空間損失 (Ls)

送受信アンテナ間距離(R)における、自由空間の伝搬損失。

$$L_s = 20 \times \log(4\pi R / \lambda)$$

R = 伝搬距離 (m) λ = 波長 (m)

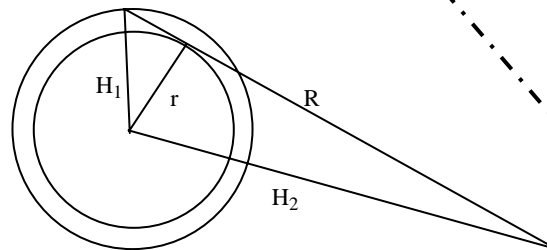
回線設計においては、最大伝搬路長で計算する。

地上局回線：最低仰角値

衛星間通信：地球との接線方向 (可視限界値)

伝搬距離 (最大) の算出
衛星間通信の場合

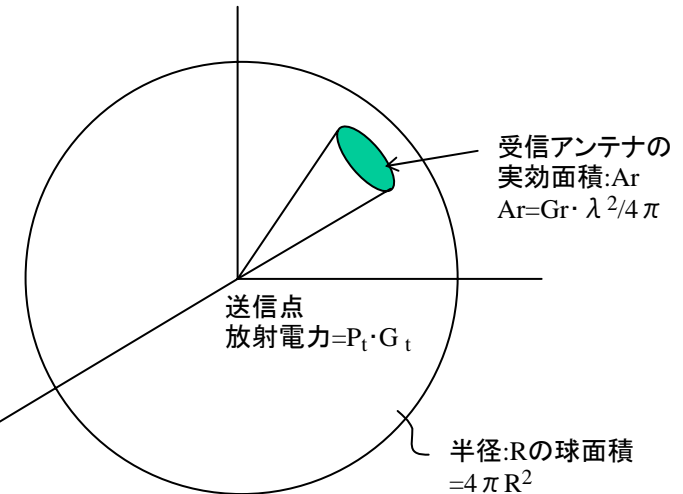
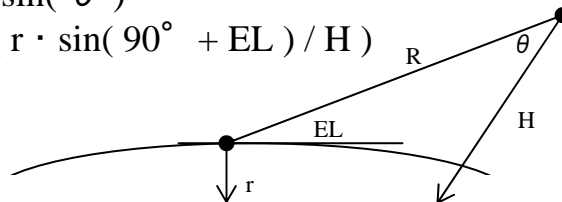
$$R = \sqrt{H_1^2 - r^2} + \sqrt{H_2^2 - r^2}$$



地上一周回衛星間

$$R = r \cdot \sin(90^\circ - EL - \theta) / \sin(\theta)$$

$$\theta : \text{衛星アンテナ角} = \sin^{-1}(r \cdot \sin(90^\circ + EL) / H)$$



$$\begin{aligned} \text{受信可能電力} &= P_t \cdot G_t / 4\pi R^2 \times G_r \cdot \lambda^2 / 4\pi \\ &= P_t \cdot G_t \cdot G_r / (4\pi R / \lambda)^2 \end{aligned}$$

受信C/Noの算出 電波伝搬上の影響

大気吸収損失 (La)

大気ガスに含まれる酸素、水蒸気の分子による電磁波の吸収による損失。

地上局仰角(EL)が10deg以上の場合、下式で求まる。

$$La = \gamma_o r_o + \gamma_w r_w \quad [\text{dB}]$$

$$r_o = 4/\sin(\text{EL}) \quad \text{酸素層通路長(m)} \quad \gamma_o = \text{酸素吸収係数(dB/m)}$$

$$r_w = 2/\sin(\text{EL}) \quad \text{水蒸気層通路長(m)} \quad \gamma_w = \text{水蒸気吸収係数(dB/m)}$$

仰角が10deg未満の時は、各通路長に対し地球の丸みを考慮する必要有り。

対静止衛星用 仰角ELの計算

$$EL = \tan^{-1} \left\{ \frac{\cos(\beta) - r/H_s}{\sqrt{1 - \cos^2(\beta)}} \right\}$$

$$\cos(\beta) = \cos(\phi_\tau) \cdot \cos(\lambda_S - \lambda_\tau)$$

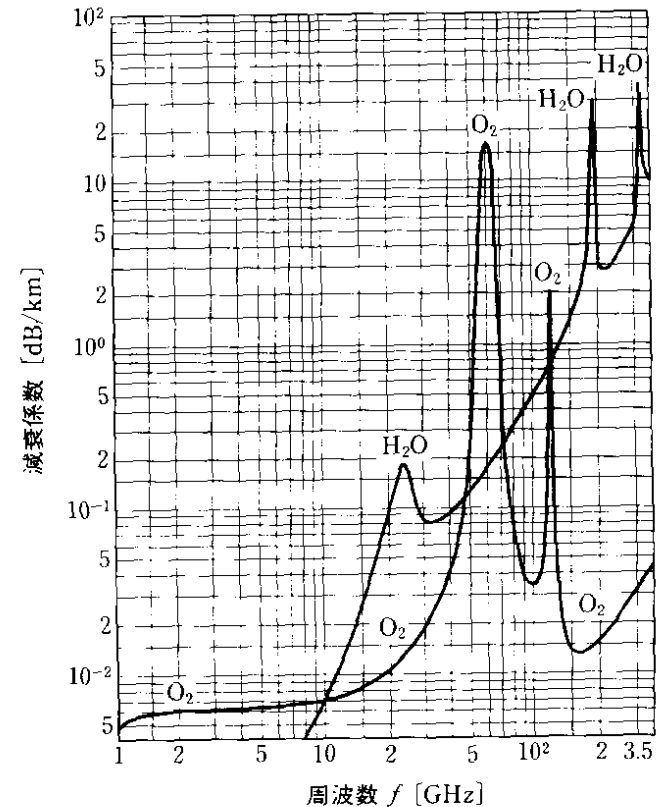
ここで、 ϕ_τ : 地球局緯度

λ_S : 衛星経度

λ_τ : 地球局経度

r : 地球半径=6378.14km

H_s : 地心からの衛星高度=42160km



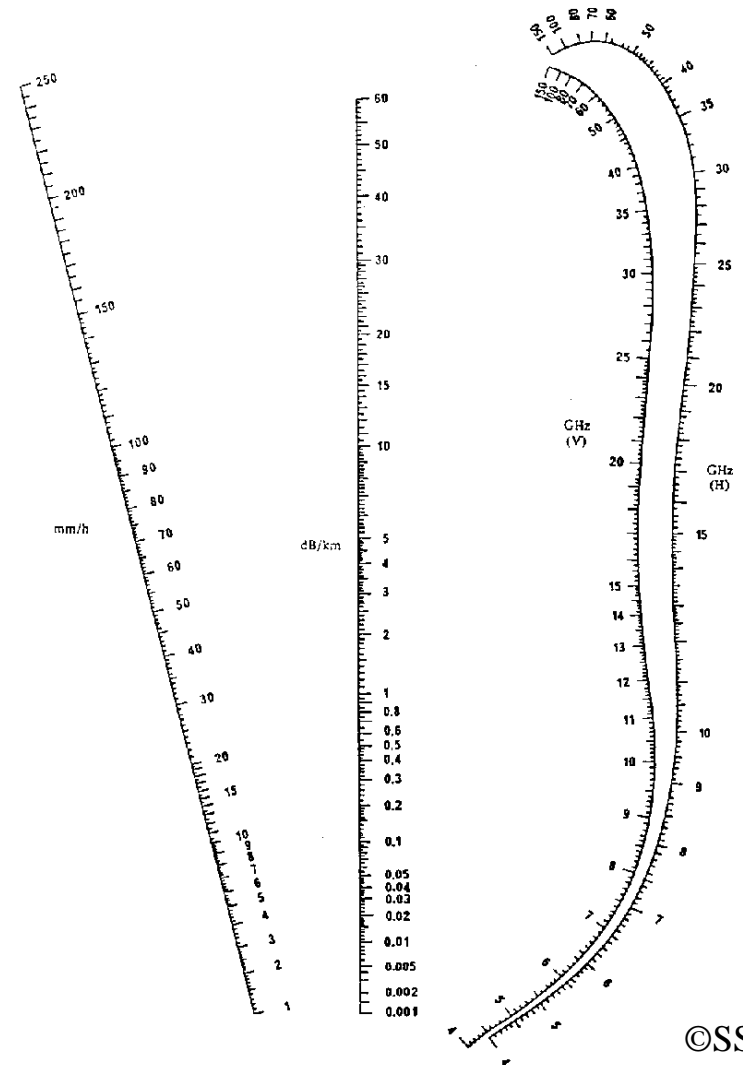
大気ガスによる電波の減衰 [ITU, 1994 a]
(気圧: 1013hPa, 温度: 15°C, 水蒸気量: 7.5g/m³)

受信C/Noの算出 電波伝搬上の影響

降雨減衰 (L_{RA}) 減衰係数の設定

次のパラメータから、減衰係数(dB/km)を読み取る。

- 搬送波周波数
- 降雨強度
- 偏波



受信C/Noの算出 電波伝搬上の影響

天空雑音増加

- ・大気及び降雨は、熱雑音放射源として影響する。
- ・晴天時の雑音温度は、地上局受信G/Tの雑音温度として取り込まれ、降雨時の雑音温度増加分が別出しで計上する必要がある。
- ・降雨時の天空雑音温度 T_{RAIN} は、次式で求まる

$$T_{RAIN} = T_m \cdot (1 - 10^{-L_{RA}/10})$$

ここで、 L_{RA} : 降雨減衰量[dB]

T_m : 平均温度 = $(273 + T_G)/2$ [K] ITU勧告では、降雨時の T_m は260K

T_G : 地表面温度[K]

- ・上記、降雨による雑音温度増加量はシステム雑音温度に加算される。
従って、天空雑音によるG/Tの低下量は下式で求まる。

$$\Delta = 10 \cdot \log(1 + T_{RAIN}/T_s)$$

回線設計とハードウェア実現性

回線計算表の作成

回線計算表は、
 ・達成可能なC/No算出表
 ・要求C/No算出表
 を併記して1組になる。

ここで紹介する書式は、現在
 回線設計基準試案作成委員会
 で討議中のものである。

回線設計表

No.	項目	単位	上り回線	下り回線	備考
1	周波数	GHz			
2	送信EIRP (内訳) 送信機出力 送信系給電損失 送信アンテナ利得 送信アンテナインテグ損失	dBW dBW dB dBi dB			単位として[dBcpi]も使用可
3	自由空間損失	dB			距離= [km], EL= [deg]
4	偏波損失	dB			
5	大気吸収損失	dB			
6	降雨損失(不稼働率 [%])	dB			
7	各種損失	dB			
8	G/T (内訳) 受信アンテナインテグ損失 受信アンテナ利得 受信系給電損失 システム雑音温度 天空雑音温度増加分	dB/K dB dBi dB dBK dB			単位として[dBcpi]も使用可
9	受信電力	dBW			
10	雑音電力密度	dBW/Hz			
11	受信C/No	dBHz			
12	上り回線C/No	dBHz			
13	総合C/No	dBHz			

(受信、総合C/No算出表では損失は負の記号を付ける。)

受信C/Noの算出

回線計算と干渉計算の区分け

- 干渉波の影響は、次の理由から通常回線計算では適用外である。
 - ・混信回避を条件に周波数選定していること。
共存条件はシステム雑音温度増加率:6%以下(0.25dBの悪化に相当)
 - ・干渉相手の出現は流動的であり、回線計算の前提となり得ない。
 - ・干渉度合いは、相手システムの周波数利用状況によって変化し、地理的制約等もからみ、一律計上できるものではない。
 - ・共存可否の判断は、相互のシステムのミッション遂行に支障が無いかの評価が基本であり、自システムの回線を確定しておくことが重要。

- 干渉相手が特定化された場合には、干渉度合いを評価し、共存困難と判断された場合、2システム間個別交渉に入り、詳細情報を交換する。

- 干渉計算方法は、基本的に回線計算手法と同じであるが、晴天時等の計算条件、考え方等で一部異なっている。

回線設計とハードウェア実現性

回線計算・実際との差異

地上試験結果と軌道上試験結果の比較

GMS-5 ミッションチェック結果サマリ

動作モード	主系予測値差異	従系予測値差異	備考
S-VISSR	+0.5dB	+0.2dB	3回測定結果共同一
WEFAX	-0.2~+0.8dB	-	
VISSR	-0.8~-0.2dB	-0.1~+0.5dB	
S-TLM	+0.6~+0.7dB	+0.8dB	従系は3回測定結果共同一
DCPI	-0.7~-0.6dB	+0.2~+0.4dB	
DCPR/SAR	-1.1dB	(-4.4~-4.3dB)	外来雑音の影響が大きく測定精度悪い

軌道上実測結果は、
1dB以内の精度で
予測値と一致

BS-3 アンテナパターン軌道上試験結果サマリ

都市	単体試験結果	軌道上試験結果
稚内	33.5 (-8.2)	33.8 (-7.9)
札幌	37.5 (-4.2)	37.7 (-4.0)
東京	39.8 (-1.9)	39.2* (-2.5)
大阪	41.7 (0.0)	41.7* (0.0)
熊本	40.5 (-1.2)	40.9 (-0.8)
沖縄	37.0 (-4.7)	37.3 (-4.4)
与那国	29.1 (-12.8)	29.4 (-12.3)
南大東	34.8 (-6.9)	33.3 (-8.4)
小笠原	30.7 (-11.0)	29.2 (-12.5)

ETS-VI USB 系軌道上試験結果サマリ(送信電力比較)

測定対象	地上試験結果	軌道上試験結果
A系 -1	33.95dBm	34.60dBm
A系 -2		34.20dBm
B系 -1	34.55dBm	34.84dBm

*:軌道上試験結果は、地上局受信レベルから回線解析により逆算した値
“-1”は打ち上げ約3ヶ月後に測定、“-2”は約16ヶ月後に測定:

()内は相対利得

*:降雨のため降雨損失推定値 0.9dB を補正。

1991年10月10日18時のデータ

回線設計のまとめ

回線計算の目的

- システム構築条件・規模・サービス範囲立案(概念設計～予備設計)
- ハードウェア構成・仕様設定(予備設計～基本設計)
- ハードウェア性能とシステム成立性(詳細設計～)

回線設計条件

- 回線計算は想定される最悪条件下で行う。
[最遠距離、高降雨減衰、ハードウェア仕様値]
- ハードウェア製造後は、実測値の最悪値を用いて解析精度を高める。
- 外部干渉は個別に検討し、回線計算上は含めない。
- 誤り率要求と回線マージンは個別要求として扱う。

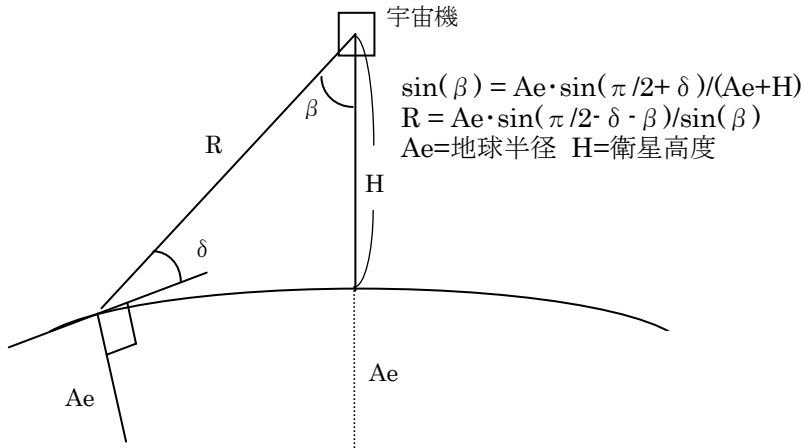
回線設計とハードウェア実現性

PFD適合性解析

- 地上回線保護の観点から、地表面到来角に応じてPFD規定が要求。
- PFD規定値は極めて厳しく、特に衛星間通信フォワードリンクは、通信方向が地球方向になるため、以下の対策が必要。
 - SSAフォワードはスペクトラム拡散による電力密度低減が必須
 - KSAフォワードは畳み込み符号化採用が必要になる場合あり
(JEM ICSではペイロード形状制約から符号化採用)
- 残留キャリアPMのUSB回線では、送信電力:数10mWでも満足させるのに四苦八苦の状況
- BPSK/QPSK等デジタル変調でも、残留搬送波レベルが足枷となり、高速伝送に制約が生じてきた。

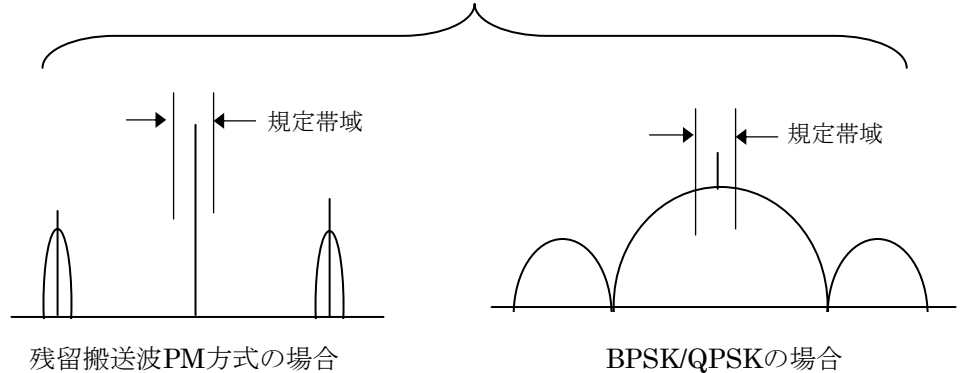
PFD適合性解析 解析方法

PFD計算



$$PFD = PSD - 10 \cdot \log(4 \pi R^2)$$

規定帯域内最大電力密度(PSD)計算



変調スペクトラムから、規定帯域(Xバンド以下:4kHz、Xバンド以上:1MHz)に含まれる最大電力密度を求める。

代表例

① 残留搬送波PM方式 (通常、搬送波成分の変調損失min値から算出)

$$PSD = PTX + 10 \cdot \log \left\{ \prod_{i=1}^N J_0^2(x_i) \cdot \prod_{j=1}^M \cos^2(y_j) \right\}$$

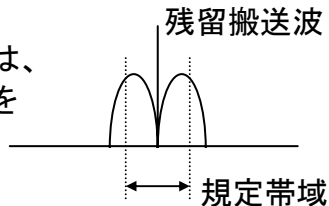
xi:i 番目の正弦波信号位相変調度
yj:j 番目の矩形波信号位相変調度

② デジタル変調 (BPSK,QPSK)方式

$$PSD = PTX + 10 \cdot \log \left\{ \int_{-BW/2}^{BW/2} \frac{\sin^2(2\pi f/R_s)}{R_s (2\pi f/R_s)^2} df + 10^{Pd/10} \right\}$$

Pt = 出力電力
f = オフセット周波数
Rs = シンボルレート
Pd = 残留搬送波レベル

PCM-PM波成分については、規定帯域内に含まれる量を個別に積算し加算する。

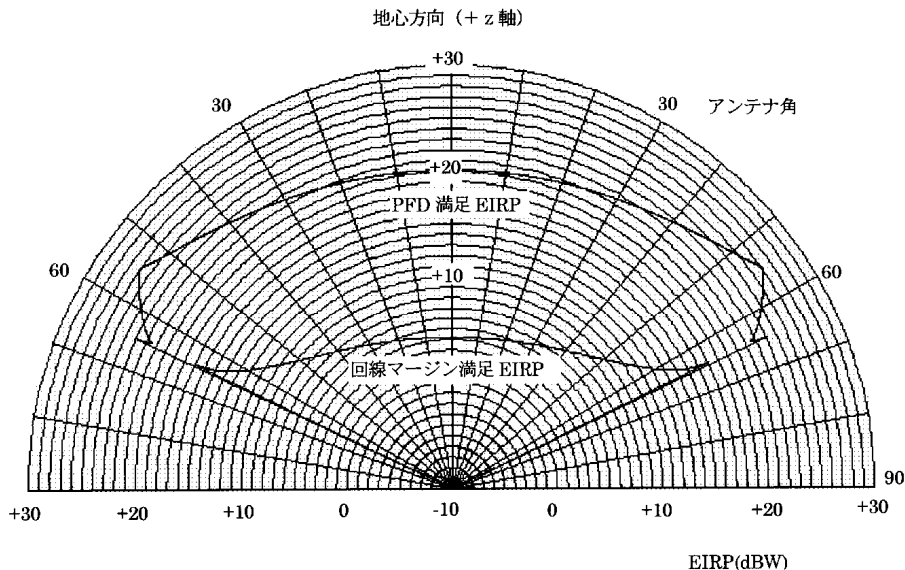


残留搬送波レベルは変調器のI/Qchアンバランス性で生じ、地上レベルでも -35dBc程度が限界

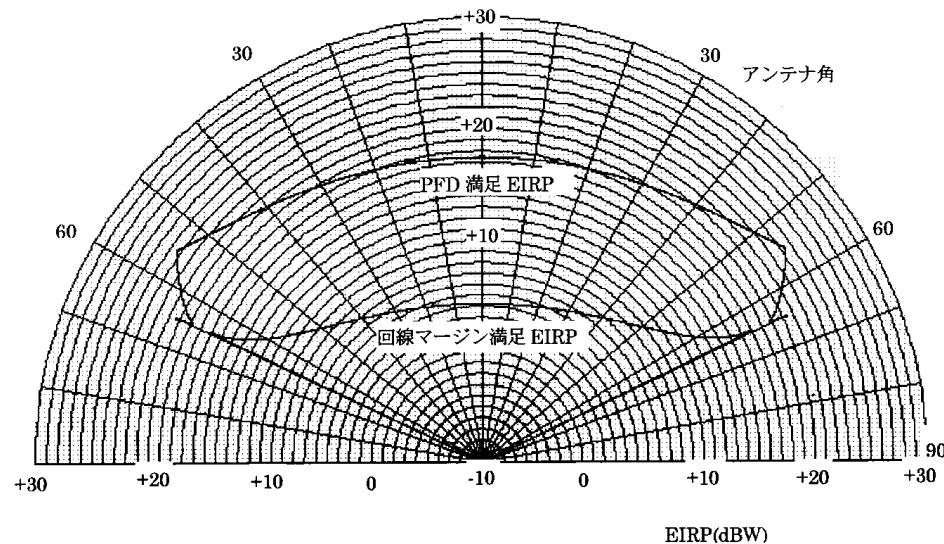
PFD適合性解析

回線品質とPFD規定両立化の限界

高速データ伝送の場合、残留搬送波レベルをどこまで抑圧できるかが決めて



(a) 残留搬送波レベル:-33dBc の場合



(b) 残留搬送波レベル:-30dBc の場合

宇宙通信概論/通信機器・参考文献等

- 宇宙システム概論
 - “宇宙システム概論-衛星の設計と開発” 培風館 茂原正道著
 - “アメリカの小型衛星開発の動向” 日本ロケット協会 齋藤宏文著
- 衛星通信
 - “ウェーブサミット講座 衛星通信” オーム社 飯田尚志編著
 - “アンテナ工学” 総合電子出版社 遠藤敬二他著
- マネジメント
 - “日本宇宙開発物語” 三田出版会 齋藤成文著
 - “宇宙プロジェクト実践” 日本ロケット協会 栗木恭一著
 - “科学技術者の倫理-その考え方と事例” 丸善 日本技術士会訳編
- 機器設計関連
 - “抵抗&コンデンサの適材適所” CQ出版社 三宅和司著
 - “改訂 高周波回路設計のノウハウ” CQ出版社 吉田武著
 - “トロイダル・コア活用百科” CQ出版社 山村英穂著
 - “電磁界シミュレータで学ぶ高周波の世界” CQ出版社 木暮裕明著