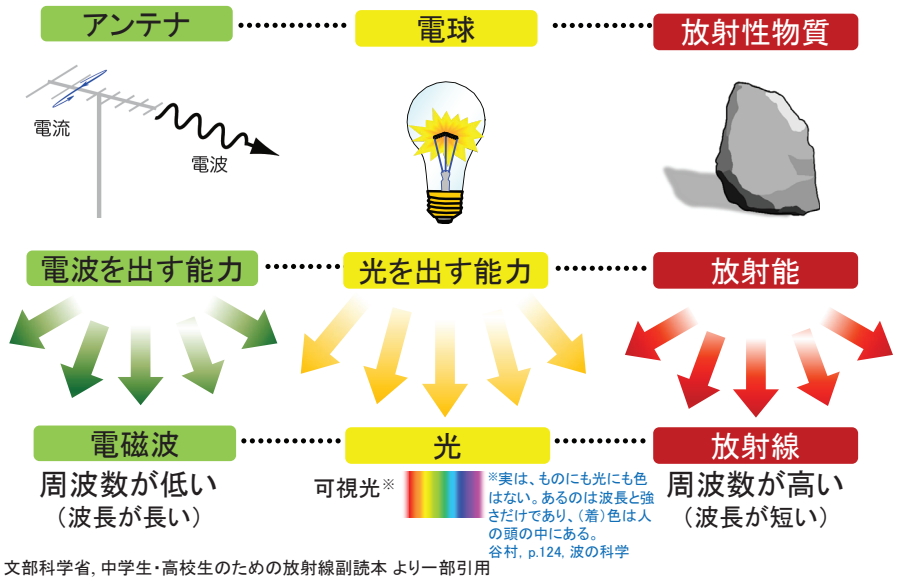
アンテナ
-放送電波の測定-

1st 2012/04/20
Lst 2020/01/30

通信ネットワーク工学科
CN-5 通信工学実験Ⅱ（3h）

電波・光・放射線の区別



文部科学省, 中学生・高校生のための放射線副読本 より一部引用

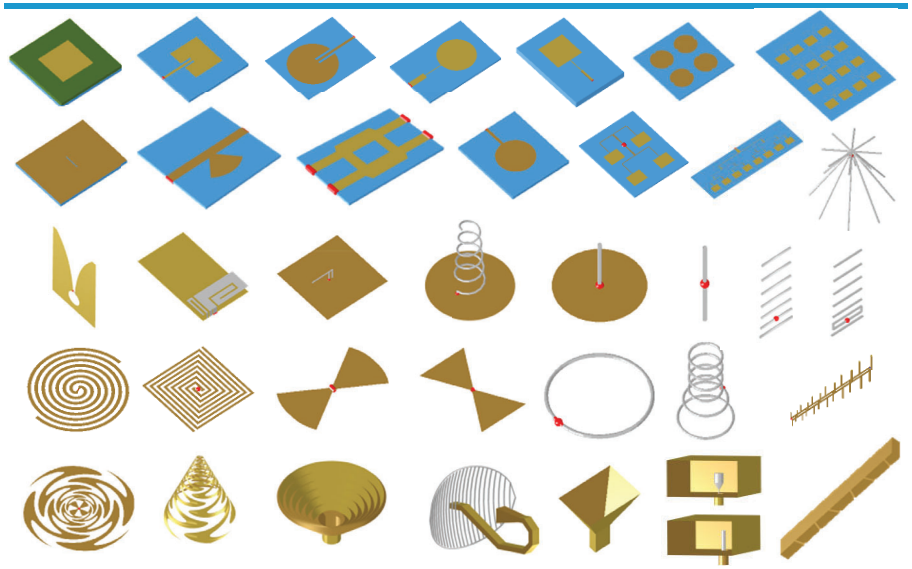
アンテナの分類例

- アンテナ
  - 素子
    - 線状 → ダイポール, モノポール, スリーブ, ブラウン, ループ, ヘリカル, 対数周期
    - 平面 → マイクロストリップ, クランクライン, スロット, ノッチ, スパイラル
    - 立体 → ホーン, 逆F, ダブルリッジドガイド
  - アレイ
    - 構造 → 八木・宇田, ビーム, スロットアレイ, マイクロストリップアレイ
    - 機能 → フェーズドアレイ, アダプティブアレイ, セルフフェージングアレイ
  - 反射鏡
    - 対称型 → パラボラ, カセグレン, グレゴリアン, 球面鏡, コーナーリフレクタ
    - オフセット型 → オフセットパラボラ, オフセットカセグレン, オフセットグレゴリアン
  - レンズ
    - 誘電体 → 誘電体レンズ, ルーネベルクレンズ
    - 金属 → 金属板レンズ, パスレングスレンズ
  - その他 → 誘電体ロッド, 漏れ波, アクティブ

郵政省通信総合研究所 ``通信の百科事典 -通信・放送・郵便のすべて-' p.70, 丸善, 1998

いろいろなアンテナ

AntennaMagus
Explore.Design.Deliver.

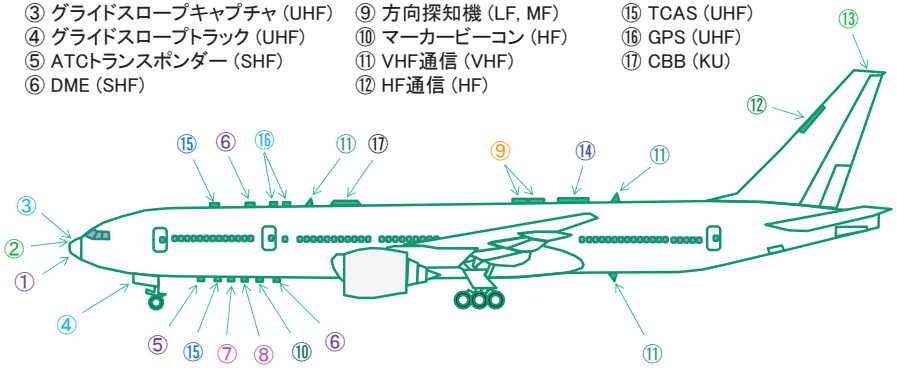


http://www.antennamagus.com/ より引用

すべてのアンテナはハイパスフィルタと同じ周波数特性

航空機アンテナの種類（例）

① 気象レーダー (SHF)
② ローカライザー (VHF)
③ グライドスロープキャプチャ (UHF)
④ グライドスロープトラック (UHF)
⑤ ATCトランスポンダー (SHF)
⑥ DME (SHF)
⑦ 電波高度計送信用 (EHF)
⑧ 電波高度計受信用 (EHF)
⑨ 方向探知機 (LF, MF)
⑩ マーカービーコン (HF)
⑪ VHF通信 (VHF)
⑫ HF通信 (HF)
⑬ VOR (VHF)
⑭ SATCOM (UHF)
⑮ TCAS (UHF)
⑯ GPS (UHF)
⑰ CBB (KU)



DME : Distance Measuring Equipment
VOR : VHF Omni directional Range
SATCOM: Satellite Communications
TCAS : Traffic alert and Collision Avoidance System
CBB : Connection by Boeing

日本航空広報部, 最新 航空実用ハンドブック, pp.181-182, 朝日新聞社

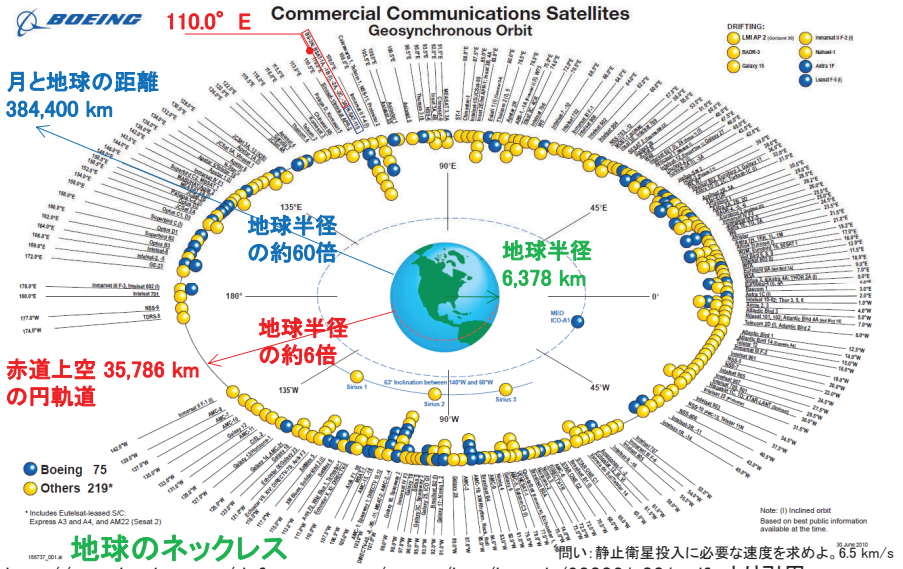
BSATのスペック

	BSAT-3a	BSAT-3b	BSAT-3c
	イラスト提供/ロッキード・マーチン社	イラスト提供/ロッキード・マーチン社	イラスト提供/ロッキード・マーチン社
	太陽風や地球，月，太陽の引力によって機体は常に動くので姿勢制御が必要		
形式	米国ロッキード・マーチン社の三軸姿勢安定型（A2100Aバス）		
全長	14.65m		18.9m
チャンネル	8 （わが国に割り当てられているchのうち12chから選択可能）		12 わが国に割り当てられているch全てを同時運用可能）
周波数	上り：17GHz 帯／下り：12GHz 帯（右旋円偏波）		
送信出力	寿命末期120W以上（食期間中も放送可能）		※（参考）GPS衛星 2000 kg 惑星探査機はやぶさ 500 kg
送信機構成	14本(予備6本含む)で 冗長系スイッチネットワークを構成		16本(予備4本含む)で 冗長系スイッチネットワークを構成
重量	打ち上げ時：約1980kg	打ち上げ時：約2060kg	打ち上げ時：約2906kg
設計寿命	13年以上		15年以上　主に位置制御用の噴射用 高圧ガスタンク容量の限界
打ち上げ	ロケット：アリアン-5 平成19年8月15日	ロケット：アリアン-5 平成22年10月29日	ロケット：アリアン-5 平成23年8月7日
運用開始	平成19年11月1日	平成22年12月8日	平成23年9月21日

http://www.b-sat.co.jp/broadcasting-satellite/

若井，トコトンやさしい無線通信の本，p.20，日刊工業新聞社

静止衛星の軌道と位置

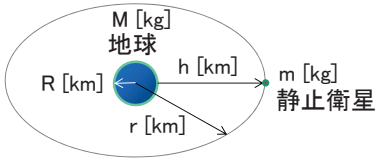


*問い：静止衛星投入に必要な速度を求めよ。6.5 km/s

http://www.boeing.com/defense-space/space/bss/launch/980031_001.pdf　より引用

静止衛星の高度と速度の計算

【演習】静止衛星の高度hと速度vを求めよ。ただし、赤道半径はR=6378 km，地球質量はM=5.9724×10^{24} [kg]，万有引力定数はG=6.67408×10^{-11} [m^3 kg^{-1} s^{-2}]とする。



地球半径	R [km]	6378
万有引力定数	G [m^3/kg/s^2]	6.67408E-11
地球質量	M [kg]	5.97243E+24
	GM	3.98605E+14
自転速度	ω [rad/s]	7.27221E-05
	GM/$ω^2$	7.5372E+22
衛星軌道半径	r [m]	42241248.08
衛星軌道半径	r [km]	42241.24808
衛星高度	h [km]	35863.24808
衛星速度	v [m/s]	3071.870246

釣合いの式より

$$G\frac{Mm}{r^2} = m\frac{v^2}{r}$$

$v = r\omega$ より

$$G\frac{Mm}{r^2} = m\frac{(r\omega)^2}{r}$$

これをrについて求めると

$$r = \left(\frac{GM}{\omega^2}\right)^{1/3}$$

$$h = r - R = \left(\frac{GM}{\omega^2}\right)^{1/3} - R$$

$$v = r\omega$$

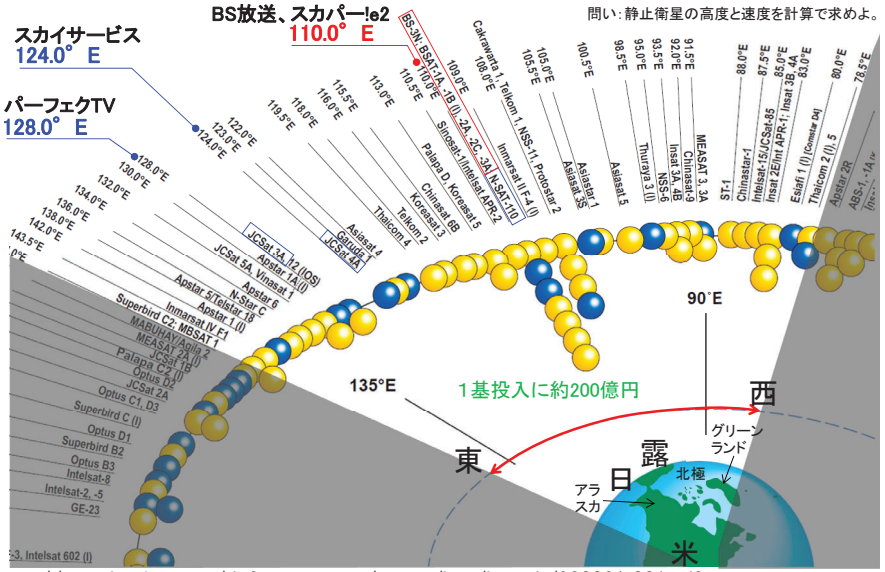
地球の自転角速度は

$$\omega = \frac{2\pi}{24 \cdot 60^2}$$

答え
h=35,863 km
v=3.072 km/s

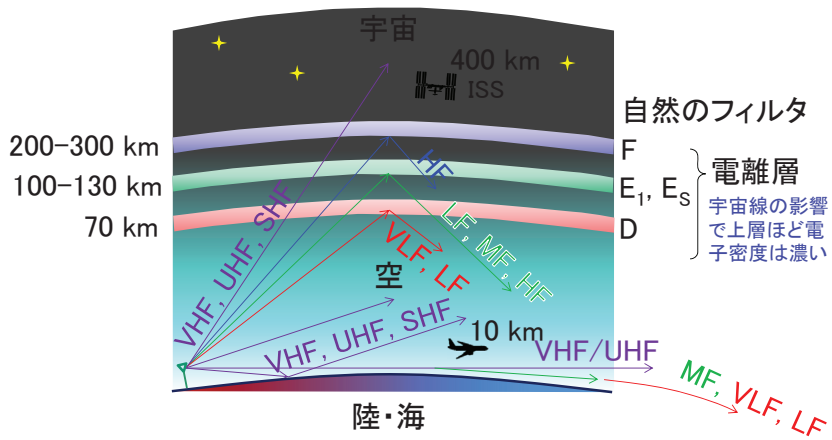
第1宇宙速度は釣合いの式で r=R とすれば求まる。

我が国から見える静止衛星



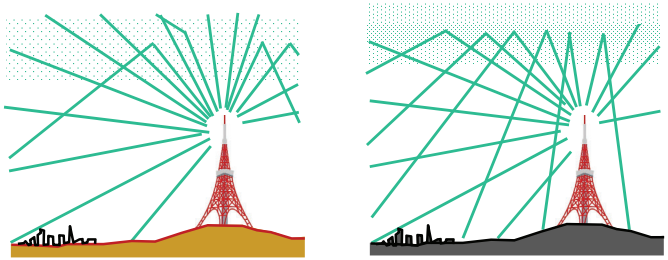
http://www.boeing.com/defense-space/space/bss/launch/980031_001.pdf

電波の分類と伝搬の概念図



放送のしくみ, p. 17, 新星出版社
電気学ポケットブック編集委員会, ``図解版電気学ポケットブック,'' p. 855, オーム社, 2003

電離層反射のイメージ

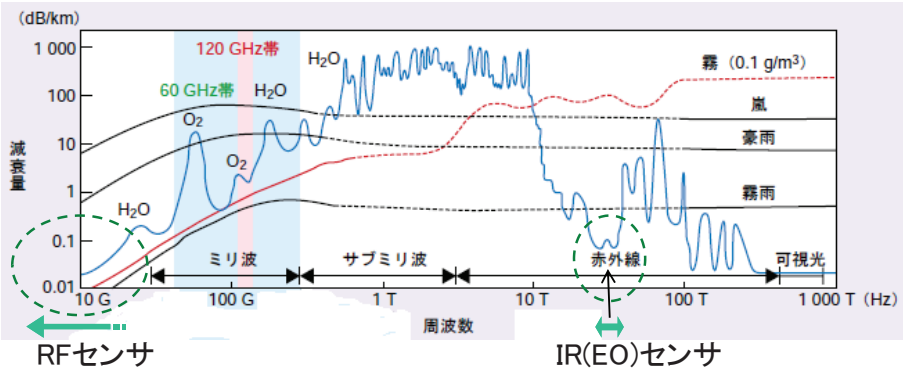


電離層の効果。日中は太陽放射による電離作用が盛んになり、電波の反射を妨げる。夜はイオンが落ち着いてきて、特に低い周波数のAM放送電波を反射する。遠く離れたところで夜の受信状態が良くなる理由である。

Paul G. Hewitt, ``地球の歴史と環境'' p.38, 共立出版, 1997

大気減衰特性

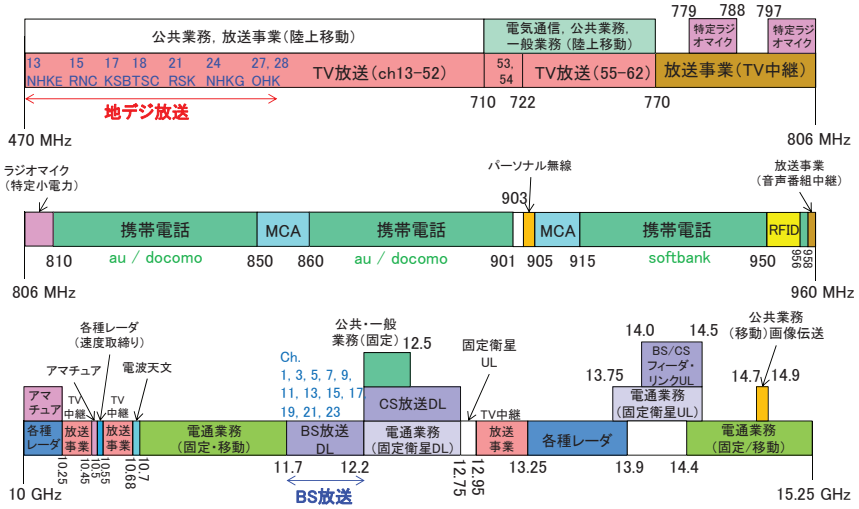
Ku帯（12–18 GHz）以上のマイクロ波および、ミリ波は**天候による減衰効果が大きい**。ミリ波以上の使用は送信電力を無用に消費することになり不利。



http://www.ntt.co.jp/journal/0409/files/jn200409036.pdf より引用

地デジ・携帯・衛星の周波数割当

【2005年7月現在】最新版は https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/myuse/use/index.htm



http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/chousa/wire/pdf/050708_2_s13.pdf
RFワールド付録，無線と高周波の国内周波数チャート2013年版，CQ出版社

放送種別と周波数・変調方式・偏波

	放送種別	バンド	周波数	波長	Ch 帯域幅	変調方式	偏波
1	AMラジオ	MF	526.5-1606.4 kHz	570 – 187 m	9 kHz	AM	垂直
2	FMラジオ	VHF	76.1 – 94.9 MHz	3.94 – 3.16 m	200 kHz	FM	水平
3	地デジ	UHF-L	470 – 578 MHz	63.8 – 51.9 cm	6 MHz	PSK, QAM	水平
4	BS	SHF	11.7-12.2 GHz	2.56 – 2.46 cm	38 MHz	PSK	右円

地デジのデータ伝送速度は16 Mbps=毎秒2 MB

何故衛星放送は円偏波か？　ヒント：地球は丸いので，緯度が90度違うと・・・

YouTube F-35 統合打撃戦闘機（JSF）分散開口システム(DAS)

デジタル放送の概要

(1) デジタル変調・・・0,1からなるビットの組み合わせを搬送電波に乗せる技術
(2) 誤り訂正・・・ノイズが入り込んだ場合に訂正する技術
(3) データ多重化・・・映像や音声などの異なった情報を織り交ぜる技術
(4) 符号化・・・映像や音声をできるだけ効率的なデジタル信号で表現する技術
(5) 視聴制限・コンテンツ保護・・・特定の視聴者だけに見せるようにしたり、勝手にコピーされたりしないようにする技術

	分類	規格
1	デジタル変調・誤り訂正方式	ARIB STD-B31
2	データ多重化方式	MPEG-TS
3	映像・音声符号化方式	MPEG-2 Video/AAC
4	視聴制限・コンテンツ保護方式	B-CAS

BS Conditional Access Systems (B-CAS)：衛星放送限定受信システム

鳥取ループ，B-CAS事故 `8674422’ 2012年テレビ視聴制限崩壊の真実，p.17 示現社

デジタル信号の暗号化

「シーザーの暗号化」とは・・・
例えば、1を2に変え、2を3に変えるというように、数値をずらして伝える方法。しかし、「数字を1つずらした」という共通暗号が一般に知られてしまうと、全員に解読されてしまう。従って、代わりに暗号の「鍵」を変える方法が現実的である。これは我々が使っている家や部屋の物理的な鍵と似ている。例えば、Aさんに対しては1を5に変え、2を6に変えて伝える。この場合は「数字を4つずらした」という暗号になるが、Bさんに対しては1を7に変え、2を8に変えて伝える。この場合は「数字を6つずらした」という暗号になる。つまり、Aにとっては「4」とBにとっては「6」という数字が暗号の「鍵」ということになる。即ち、暗号を破るということは、この数字を見つけるということになる。しかし、この場合の「鍵」は数字を1から9まで試せば済むので弱い暗号と言われる。従って、この数字を大きな値にしたり、関数にしたり、乱数を挿入したり、数字を時間とともに変化させたり（スクランブル鍵：Ksと呼ぶ）・・・ということをすればより強力な鍵になる。しかしながら、あまり複雑にしすぎると、暗号化と復号化するのに手間がかかってしまい、本来の情報を得るよりも相当のエネルギーと時間を消費する。これは本末転倒になる。Ks自体も暗号化されていて、暗号化されたKsを含む信号をECMと呼ぶ。暗号化されたKsを復号化する鍵をワーク鍵：Kwと呼ぶ。Kwは放送事業者（NHKやスカパー，WOWWOWなど）によって異なる。
　例えば、NHKのKwはB-CASカードに最初から入っている。Kwがあればその放送局の放送をすべて視聴できる。新たな放送局を視聴したい場合や視聴中止する場合に、カードに新たな放送事業者のKwを追加したり削除したりする信号をEMMと呼ぶ。EMMも暗号化されており、このEMMを復号化する鍵をマスター鍵：Kmと呼ぶ。Kmは流通しているカードごとにすべて異なる固有のものである。

鳥取ループ，B-CAS事故 `8674422’ 2012年テレビ視聴制限崩壊の真実，p.52 示現社

画像圧縮のしくみ

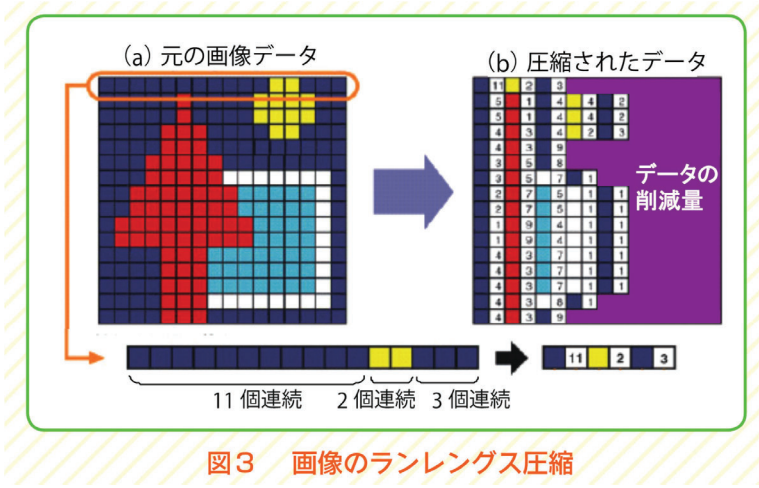
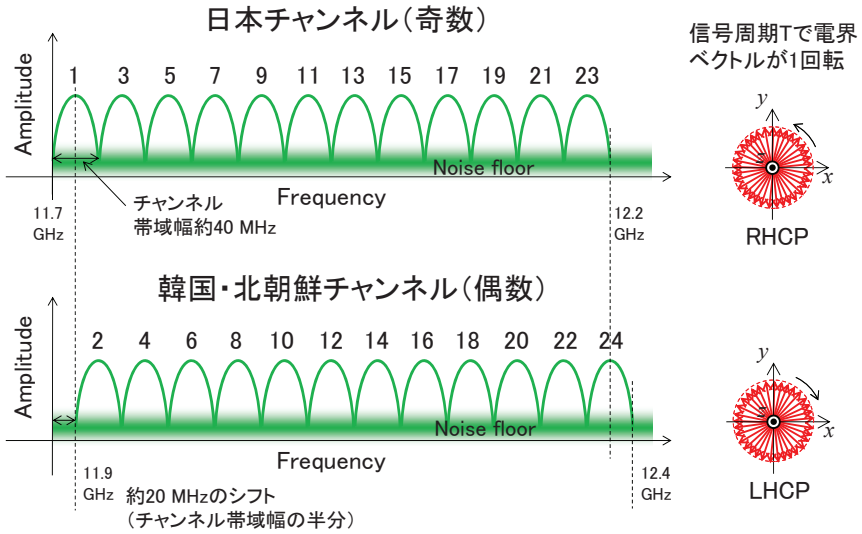


図３　画像のランレングス圧縮

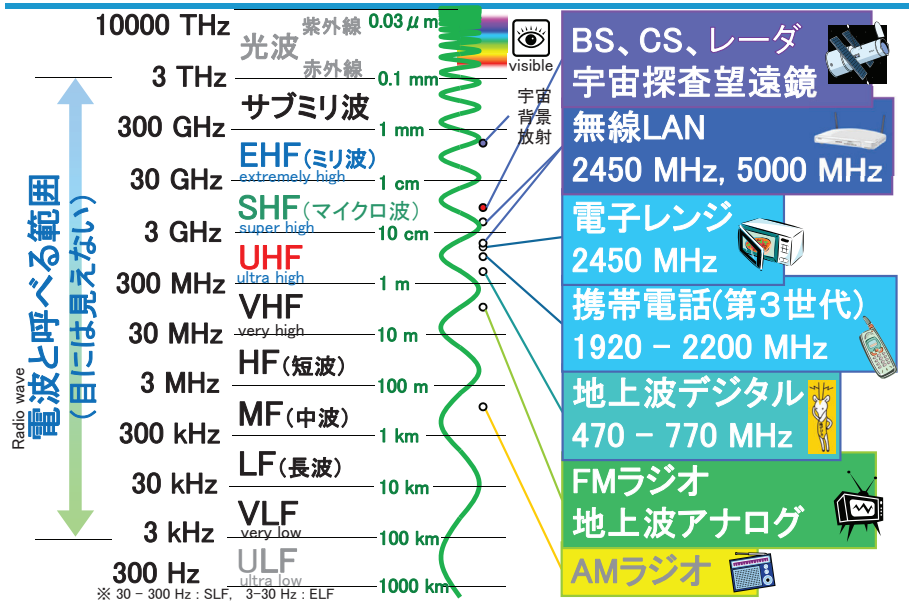
IEICE B-Plus子供に教えたい通信の仕組み　http://www.ieice.org/~cs-edit/magazine/howto.html
NHK放送技術研究所，望月貴裕，デジカメのしくみ～画素と画像圧縮～　より引用

BS放送の割り当てチャンネル

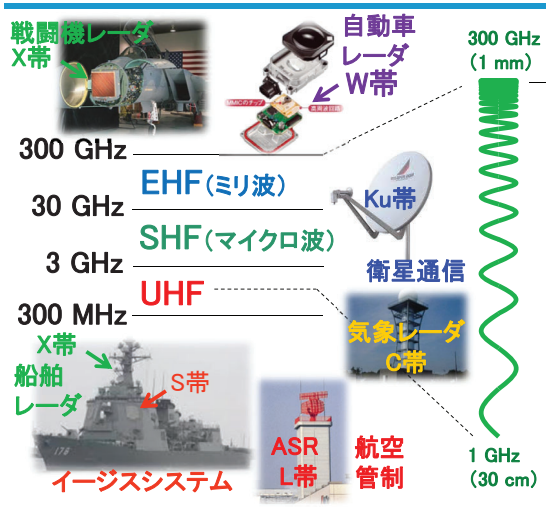


井上，``電波のキホン,'' p.101, Softbank Creative, 2011

電波の名称と周波数帯



マイクロ波，ミリ波帯の識別記号

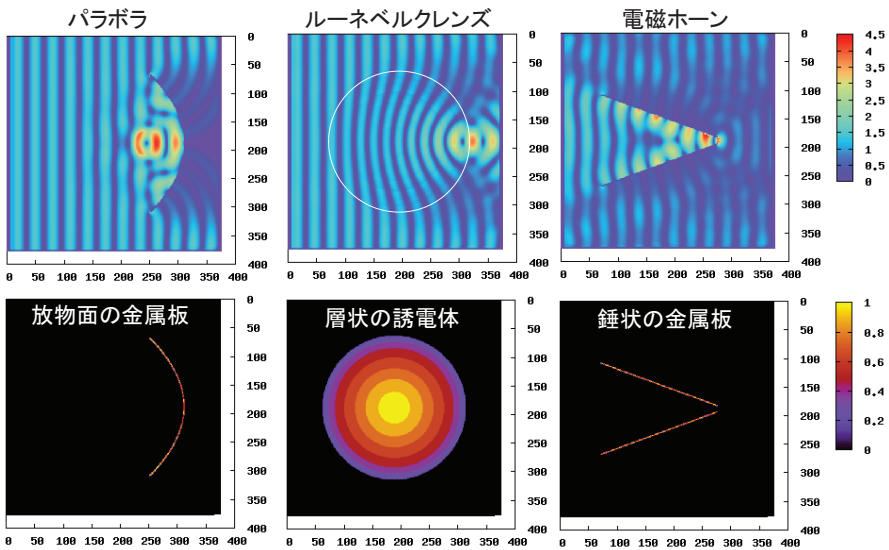


Frequency range	Band
100 – 300 GHz	mm
75 – 110 GHz	W
40 – 75 GHz	V
27 – 40 GHz	Ka※1
18 – 27 GHz	K
12 – 18 GHz	Ku※2
8 – 12 GHz	X
4 – 8 GHz	C
2 – 4 GHz	S
1 – 2 GHz	L

※1 Ka (“above” K-band)
※2 Ku (“under” K-band)

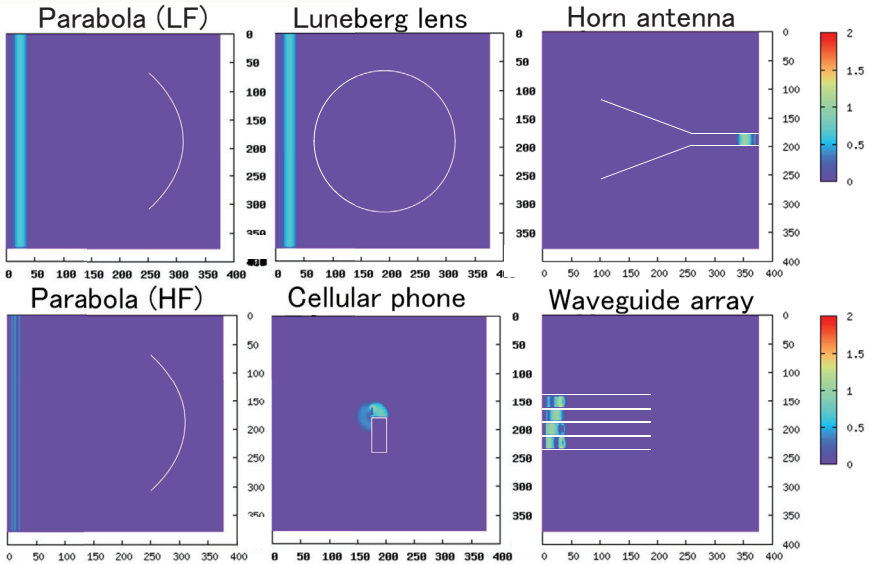
http://www.masdf.com/eagle/anpag63.html
http://techon.nikkeibp.co.jp/article/HONSHI/20090330/168029/
Thomas H. Lee, Planar Microwave Engineering, p.39 , Cambridge
Mark A. Richards, et al, Principles of modern radar, Scitech

アンテナシミュレーション



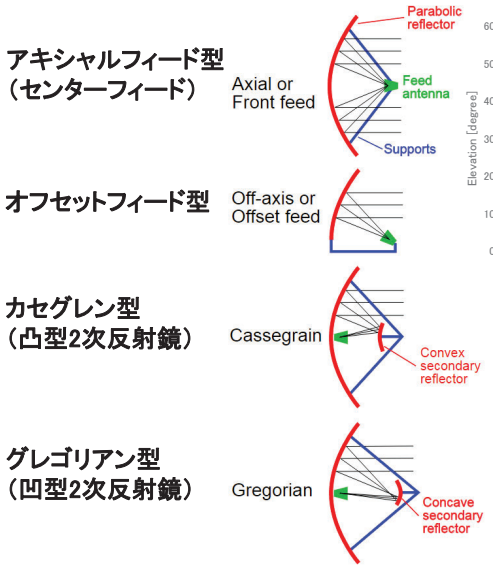
http://www.kusamalab.org/study/cem/fdtd/fdtd_2dtm/fdtd_2dtm.html

アンテナシミュレーション（動画）

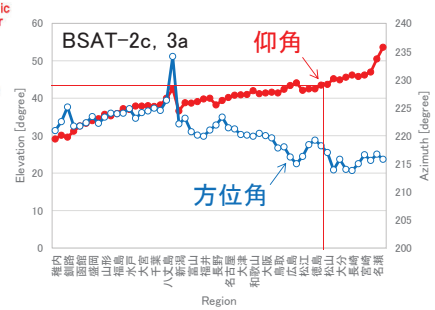


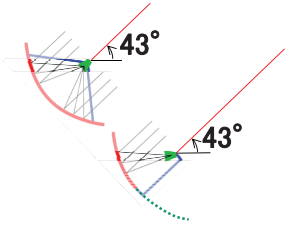
http://www.kusamalab.org/study/cem/fdtd/fdtd_2dtm/fdtd_2dtm.html

パラボラアンテナ



http://ja.wikipedia.org/wiki/ “パラボラアンテナ” より引用



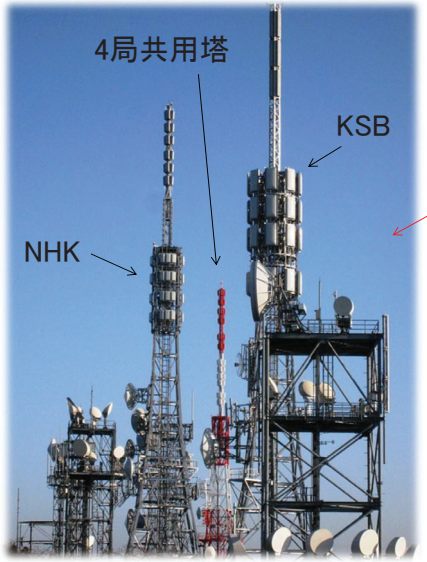


四国地区の仰角

偏波利用の具体例

携帯電話の基地局やレーダーアンテナからの電波を見ることができたら、どのように見えるだろうか？

西讃岐中継局



http://ja.wikipedia.org/wiki/

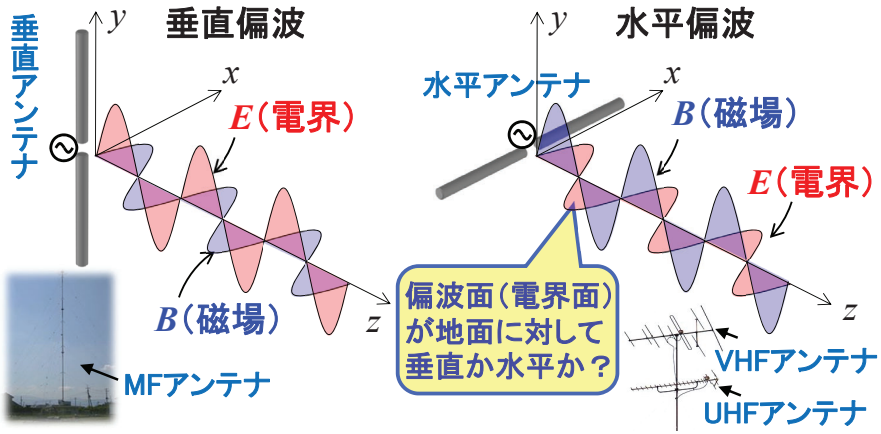
デジタル放送

リモコンキーID		1	2	4	5	6	7	8
放送局		NHKG	NHKE	RNC	KSB	RSK	TSC	OHK
岡山県	岡山	32	45	20	30	21	18	27
	津山	22	13	15	17	19	14	16
	笠岡	*32*	*45*	*20*	*30*	*21*	*18*	*27*
香川県	高松	24	13	15	17	21	18	27
	西讃	24	13					28
	東讃	38	51	20	30	21	46	27

チャンネル番号が大きいほど周波数が高い

- NHKは県別、民放は両県を1エリアとする。
- RNC・KSBの本社は香川県にあるが、岡山を本局としている。

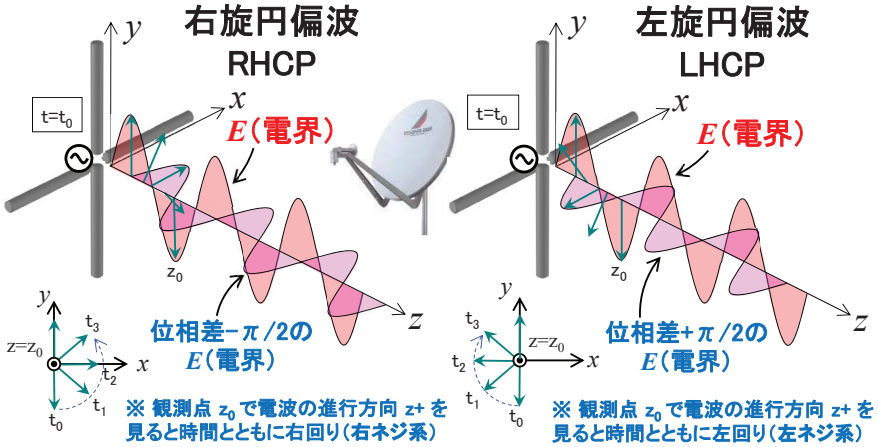
直線偏波



垂直アンテナから出た電波(垂直偏波)は水平アンテナではほとんど受信できない。

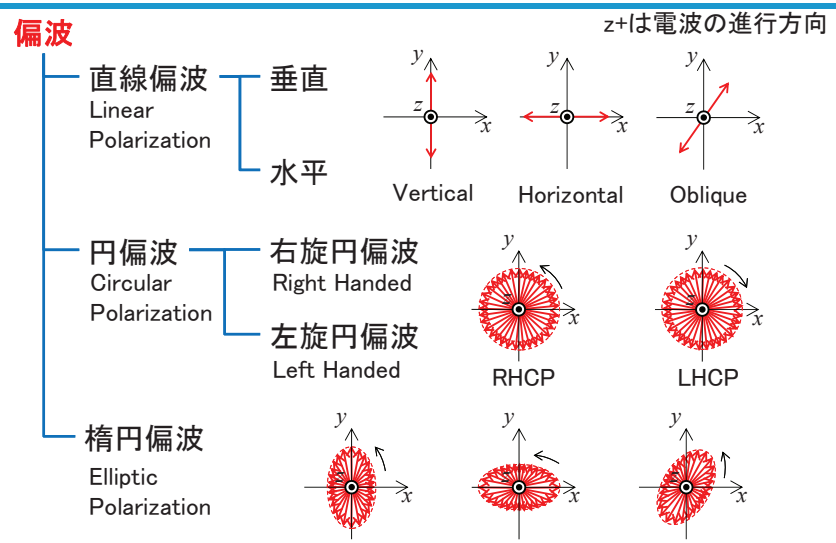
交差偏波識別度：直交偏波の分離度合　(XPD：Cross Polarization Discrimination)

円偏波



垂直アンテナと水平アンテナから出る電界の位相差±π/2で、振幅が等しいとき、偏波が回転する。これを円偏波と呼び、左旋円偏波と右旋円偏波がある。

偏波の種類

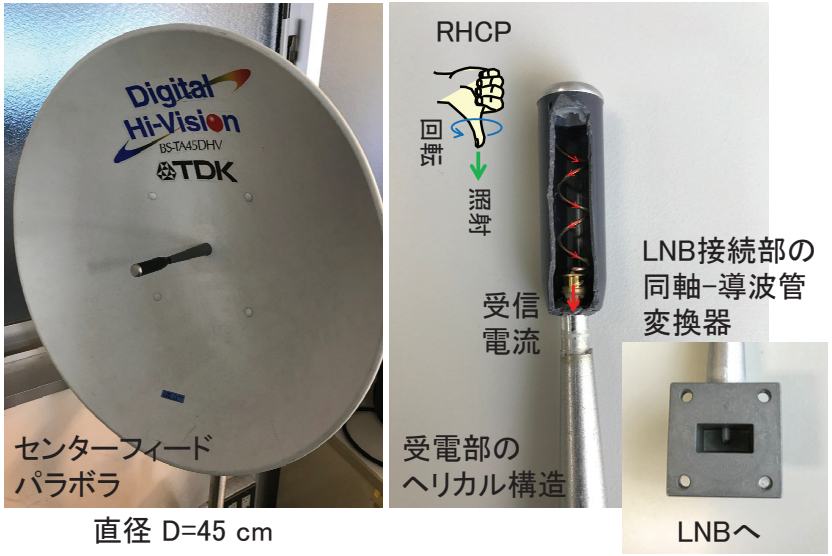


※電波分野(送り手の自分が主)と、光分野(太陽光が主で受け手が自分)では定義が逆になる。同じ一つの現象や事実でも、立場が逆になると全く逆の捉え方や言葉になって対立することは我々の日常には良くある。

円偏波／直線偏波の変換板1

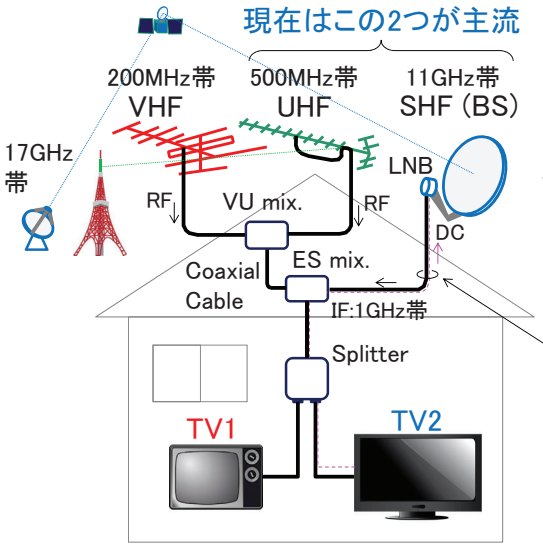
Low Noise Block down converter (LNB) フィードホーンアンテナ内部

円偏波の送受信



直径 D=45 cm

アンテナと同軸ケーブル



地上波・衛星波テレビ用

$\varepsilon_r = 1.0,\ \mu_r \simeq 1.0$

$b/a = 3.6$

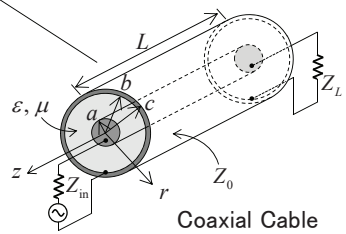
$Z_0 \simeq 75\,\Omega$

計測器用（スペアナ・SG等）

$\varepsilon_r = 2.2,\ \mu_r \simeq 1.0$

$b/a = 3.6$

$Z_0 \simeq 50\,\Omega$



Coaxial Cable

http://www.maspro.co.jp/contact/pro/pro_02.html

同軸ケーブルの例

上限周波数	fc [GHz]	33.00	62.00	35.00	62.00			
		セミリジッド SX−36	セミリジッド SX−22	セミフレキ SXL−36	セミフレキ SXL−22	フレキシブル 3D−2V	Min. loss Air line	Min. loss PE line
外導体外直径	2c [mm]	3.58	2.20	3.50	2.10	3.70		
外導体内直径（推定）	2b [mm]	3.10	1.70	3.20	1.75	3.30		
内導体直径	2a [mm]	0.92	0.51	0.93	0.51	0.96		
比率	b/a	3.37	3.33	3.44	3.42	3.44	3.60	3.60
比誘電率	ε_r	2.10	2.10	2.10	2.10	2.20	1.00	2.20
波長短縮率	$1/\sqrt{\varepsilon_r}$	0.69	0.69	0.69	0.69	0.67	1.00	0.67
係数	$1/2\pi \times \eta$	59.95	59.95	59.95	59.95	59.95	59.95	59.95
特性インピーダンス	Z_0 [Ω]	50.30	49.73	51.12	50.93	49.91	76.80	51.78

PE（ポリエチレン） ε_r=2.2
PTFE（テフロン） ε_r=2.1
Air（空気） ε_r=1.0

ワカ製作所 http://www.waka.co.jp/pdf_files/catalog_v10.pdf

同軸ケーブル用コネクタ

同軸線の最大の利点

上限周波数はあるものの，下限周波数が存在しないために一つの系で下から上まですべての周波数に対応可能

D	f_c	コネクタ
1 mm	→ 110 GHz	
1.85 mm	→ 65 GHz	V※
2.4 mm	→ 50 GHz	APC-2.4, OS-50
2.92 mm	→ 40 GHz	K※
3.5 mm	→ 33 GHz	APC-3.5, NMD3.5mm
3.5 mm	→ 22 GHz	SMA
7 mm	→ 18 GHz	APC-7
	→ 18 GHz	N
	→ 2 GHz	BNC

※ Wiltron 現Anritsuの商品名

マイクロ波同軸コネクタ, Agilent technology application note
RFワールドNo.29, p.91, CQ出版,　RFワールド No.33, p.61, CQ出版

同軸ケーブル標準コネクタ

上限周波数	f [GHz]	18.00	22.00	26.50	46.00	50.00	65.00	110.000
コネクタ名称		APC7	SMA	3.5mm	2.92mm K	2.4mm	1.85mm V	1 mm
外導体外直径	2c [mm]							
外導体内直径	2b [mm]	7.00	4.11	3.50	2.92	2.40	1.85	1.000
内導体直径	2a [mm]	3.04	1.27	1.52	1.27	1.04	0.80	0.434
比率	b/a	2.30	3.24	2.30	2.30	2.31	2.30	2.304
比誘電率	ε_r	1.00	2.10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.000
波長短縮率	$1/\sqrt{\varepsilon_r}$	1.00	0.69	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
係数	$1/2\pi \times \eta$	59.95	59.95	59.95	59.95	59.95	59.95	59.954
特性インピーダンス	Z_0 [Ω]	50.00	48.59	50.00	49.92	50.14	50.04	50.04

マイクロ波同軸コネクタ, Agilent technology application note
RFワールドNo.29, p.91, CQ出版,　RFワールド No.33, p.61, CQ出版

特性インピーダンス1

ガウスの法則より

If Q [C] is charged in the inner conductor, in the case of $a<r<b$

$$\oint_S \vec{E}\cdot d\vec{r} = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$

$$\Rightarrow \oint_S E dr = \frac{Q}{\varepsilon_0} \quad \Rightarrow E\oint_S dr = \frac{Q}{\varepsilon_0} \quad \Rightarrow E2\pi rL = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$

$$\therefore \boxed{E = \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 rL}} \quad \cdots(1)$$

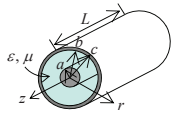
Then the potential difference V is,

$$V = -\int_b^a E dr = -\int_b^a \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 rL} dr = -\frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 L}\left[\ln|r|\right]_b^a = \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 L}(\ln b - \ln a)$$

$$\therefore \boxed{Q = \frac{2\pi\varepsilon_0 LV}{\ln\frac{b}{a}}} \quad \cdots(2)$$

Substitute (2) to (1) produces

$$E = \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 rL} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0 rL}\frac{2\pi\varepsilon_0 LV}{\ln\frac{b}{a}} = \frac{V}{\ln\frac{b}{a}}\frac{1}{r}$$

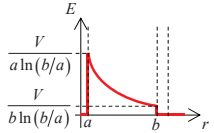


In the case of $r<a$ and $b<r$

$E = 0$

From equation (2)

$$\boxed{C = \frac{Q}{V} = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\frac{b}{a}}L \quad [\mathrm{F}]}$$



電磁気Ⅰのメインテーマ

アンペアの法則より

(i) In the case of $r<a$

$$\oint_C \vec{H}\cdot d\vec{l} = \oint_C H dl = \frac{\pi r^2}{\pi a^2} I$$

$$\Rightarrow H2\pi r = \frac{r^2}{a^2} I$$

$$\therefore H_1 = \frac{Ir}{2\pi a^2}$$

(ii) In the case of $a<r<b$

$$\oint_C \vec{H}\cdot d\vec{l} = \oint_C H dl = I$$

$$\Rightarrow H2\pi r = I$$

$$\therefore \boxed{H_2 = \frac{I}{2\pi r}} \cdots(3)$$

(iii) In the case of $b<r<c$

$$\oint_C \vec{H}\cdot d\vec{l} = \oint_C H dl = I - \frac{\pi r^2 - \pi b^2}{\pi c^2 - \pi b^2} I$$

$$\Rightarrow H2\pi r = \frac{c^2 - r^2}{c^2 - b^2} I$$

$$\therefore H_3 = \frac{I}{2\pi r}\frac{c^2 - r^2}{c^2 - b^2}$$

(iv) In the case of $r>c$

$$\oint_C \vec{H}\cdot d\vec{l} = \oint_C H dl = I - I = 0$$

$$\Rightarrow H2\pi r = 0$$

$$\therefore H_4 = 0$$

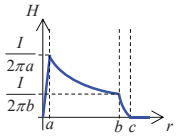
From equation (3)

$$\varphi = \int_0^L \int_a^b B_z dr dz = \int_0^L \int_a^b \frac{\mu_0 I}{2\pi r} dr dz = \frac{\mu_0 IL}{2\pi}\left[\ln|r|\right]_a^b$$

$$\therefore \varphi = \frac{\mu_0 IL}{2\pi}\ln\frac{b}{a} \quad [\mathrm{Wb}]$$

$$\boxed{L = \frac{\varphi}{I} = \frac{\mu_0 L}{2\pi}\ln\frac{b}{a} \quad [\mathrm{H}]}$$

電磁気Ⅱのメインテーマ



特性インピーダンス

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{\mu_0 L}{2\pi}\ln\frac{b}{a}\frac{\ln\frac{b}{a}}{2\pi\varepsilon_0 L}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\ln\frac{b}{a}$$

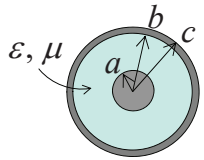
$$\therefore \boxed{Z_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\ln\frac{b}{a}}$$

電磁波の導入テーマ

特性インピーダンス2

特性インピーダンス

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\ln\left(\frac{b}{a}\right) = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}}\ln\left(\frac{b}{a}\right) = \frac{59.9586}{\sqrt{\varepsilon_r}}\ln\left(\frac{b}{a}\right) = \frac{138.061}{\sqrt{\varepsilon_r}}\log\left(\frac{b}{a}\right)$$



a, b, ε の値によって Z_0 を自由に設計できるが，

底変換の公式

$$\underbrace{\log_\alpha x}_{y\text{と置く}} = \underbrace{\log_\alpha \beta}_{c\text{と置く}} \times \underbrace{\log_\beta x}_{z\text{と置く}} \quad \Rightarrow \quad x = \alpha^y, x = \beta^z, \beta = \alpha^c$$

$$\Rightarrow \quad x = \alpha^y = \beta^z = \left(\alpha^c\right)^z = \alpha^{cz} \quad \Rightarrow \quad \therefore y = cz$$

$\alpha \to e, x \to b/a, \beta \to 10$ に置き換えると、

$$\therefore \log_e\left(\frac{b}{a}\right) = \log_e 10 \times \log_{10}\left(\frac{b}{a}\right) = 2.3026 \times \log_{10}\left(\frac{b}{a}\right)$$

導体損失（TEMモード）

$$\alpha_{cTEM} = \frac{1}{2}\frac{R_S}{\eta \ln b/a}\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right) = \frac{1}{2}\frac{\sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}}}{\eta \ln b/a}\frac{1}{b}\left(\frac{b}{a} + 1\right) \quad \propto \frac{b/a + 1}{\ln b/a} = \frac{x+1}{\ln x} = f(x)$$

※ α=f(x) が最小となる x=b/a の値は 3.5911

D. M. Pozar, Microwave Engineering 2nd, p.81,　Inan, Electromagnetic Waves, p.367

導体損が最小となるb/aの導出

$$f(x)=\frac{x+1}{\ln x}$$

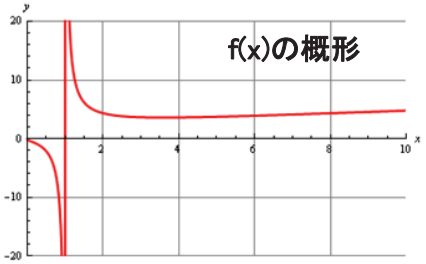
$$f'(x)=\left(\frac{x+1}{\ln x}\right)'=-\frac{x+1}{x(\ln x)^2}+\frac{1}{\ln x}$$

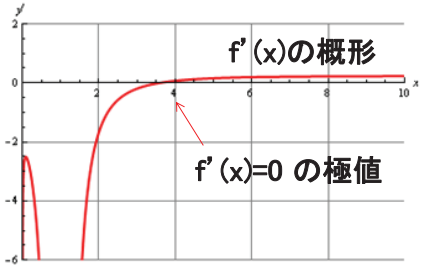
```
D[f[x], x]
```

$$-\frac{1+x}{x\,\mathrm{Log}[x]^2}+\frac{1}{\mathrm{Log}[x]}$$

```
f[x_] := (x + 1) / Log[x]
Plot[f[x], {x, 0, 10}, AxesLabel → {x, y}, PlotStyle → {R
```

```
Plot[-(1 + x)/(x Log[x]^2) + 1/Log[x], {x, 0, 10}, AxesLabel → {x, y'
```



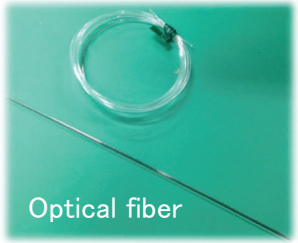


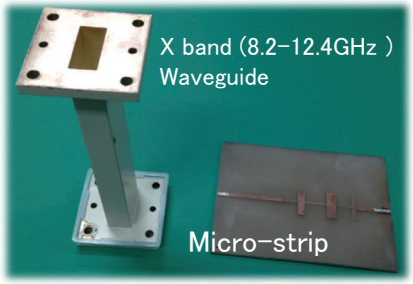

```
FindRoot[-(1 + x)/(x Log[x]^2) + 1/Log[x] == 0, {x, 2}]
```

{x → 3.59112}

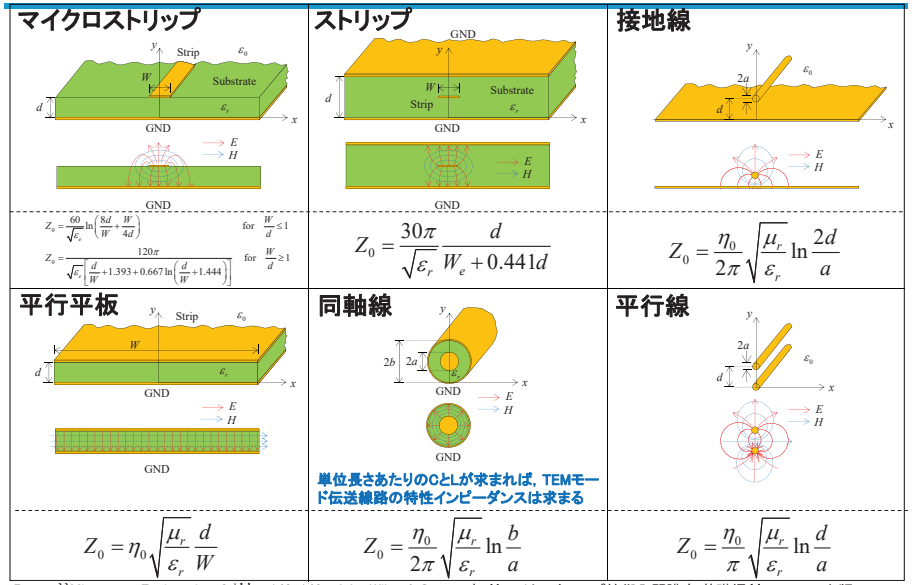
数学解析ソフト``Mathematica10,'' ニュートン法

種々の伝送線路1



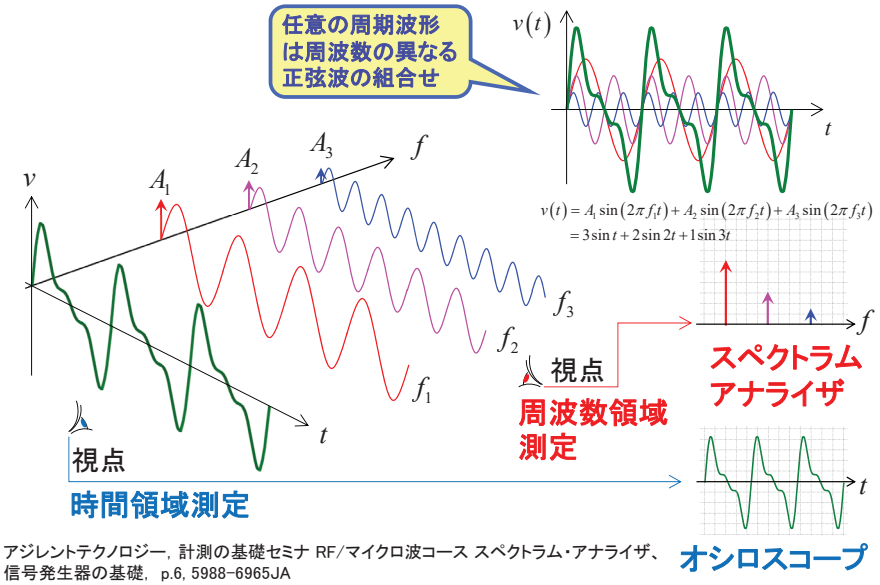


種々の伝送線路2



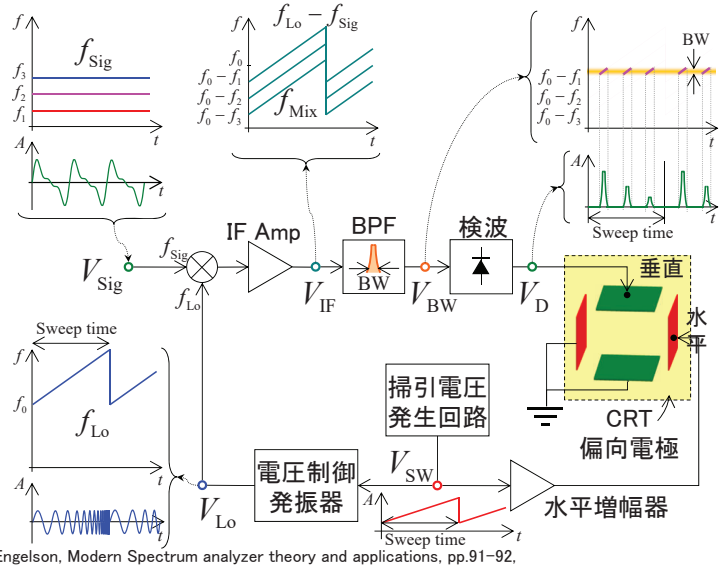
Pozar, ``Microwave Engineering, 3rd,'' p.143-146, John Wiley & Sons　森, ``マイクロウェーブ技術入門講座 基礎編,'' p.14, CQ出版, 2003.

スペアナとオシロの視点の違い



アジレントテクノロジー，計測の基礎セミナ RF/マイクロ波コース スペクトラム・アナライザ、信号発生器の基礎，p.6, 5988-6965JA

スペアナのブロック図

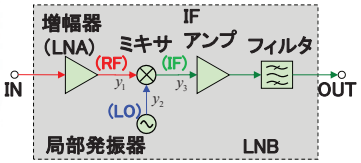


Morris Engelson, Modern Spectrum analyzer theory and applications, pp.91−92,
Robert A. Whitte, Spectrum and Network Measurements 2nd editon, pp.90,

分配器（スプリッター）

ミキサとLNB (Low Noise Block Converter)

$$y_1 = A\sin(\omega_1 t + \theta_1)$$
$$y_2 = B\sin(\omega_2 t + \theta_2)$$



とすると、y_1 と y_2 の積 y_3 は

$$y_3 = AB\sin(\omega_1 t + \theta_1)\sin(\omega_2 t + \theta_2) = AB\sin\alpha\sin\beta$$

ただし、$\begin{cases} \alpha = \omega_1 t + \theta_1 \\ \beta = \omega_2 t + \theta_2 \end{cases}$

ここで、三角関数の加法定理より

$$\sin\alpha\sin\beta = \frac{1}{2}\{\cos(\alpha-\beta) - \cos(\alpha+\beta)\}$$

例）
f_1=11.70 GHz (RF), f_2=10.75 GHz (LO) } f_3= 950 MHz (IF)
f_1=12.20 GHz (RF), f_2=10.75 GHz (LO) } f_3=1450 MHz (IF)

$$y_3 = y_1 y_2 = AB\frac{1}{2}\{\cos[(\omega_1 t+\theta_1)-(\omega_2 t+\theta_2)] - \cos[(\omega_1 t+\theta_1)+(\omega_2 t+\theta_2)]\}$$

$$= \frac{AB}{2}\{\cos[(\omega_1-\omega_2)t+(\theta_1-\theta_2)] - \cos[(\omega_1+\omega_2)t+(\theta_1+\theta_2)]\}$$

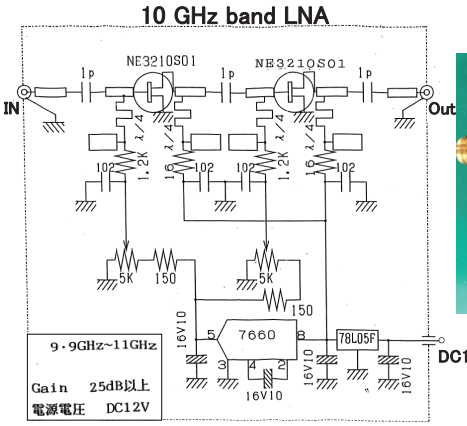
出力 y_3 に入力 y_1 とローカル y_2 の差の周波数が現れる。
即ち、$f_3=f_1-f_2$ が成り立つ。

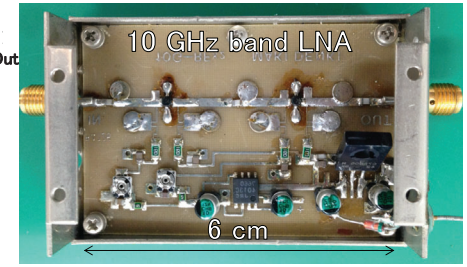
問. LNBを使って周波数をダウンコンバートする理由を，
回路寸法と波長の観点から説明せよ。

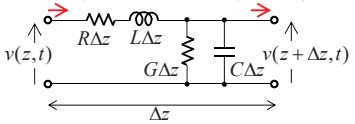
分布定数と集中定数

10 GHz band LNA

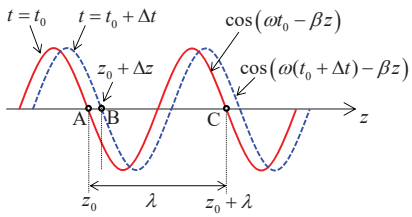
http://www.makidenki.co.jp/







R [Ω/m]
L [H/m]
G [S/m]
C [F/m]



パラボラ半値ビーム幅と利得

開口面アンテナ利得は半値ビーム幅Bを用いて次式(1)で与えられることを示せ。

$$G \simeq \frac{4\pi}{B^2} \qquad (1)$$

Dを開口直径とすると半値ビーム幅 $\theta_{1/2}$ は

$$\theta_{1/2}\,[\mathrm{deg}] \simeq 70\frac{\lambda}{D} \qquad (2)$$

$$\theta_{1/2}\,[\mathrm{rad}] \simeq 70\frac{\lambda}{D}\frac{\pi}{180} = B \qquad (3)$$

従って

$$B = \frac{7\pi}{18}\frac{\lambda}{D} \qquad (4)$$

$$B^2 = \left(\frac{7\pi}{18}\right)^2\left(\frac{\lambda}{D}\right)^2 \qquad (5)$$

→ **半値ビーム幅の理論値が導出できる**

式(1)右辺を計算して，4≒π，7π/18≒1とすれば，

$$\frac{4\pi}{B^2} = \frac{4\pi}{\left(\frac{\lambda}{D}\right)^2\left(\frac{7\pi}{18}\right)^2} \simeq \frac{\pi^2 D^2}{\lambda^2} \qquad (6)$$

式(6)は開口面アンテナの利得に等しい

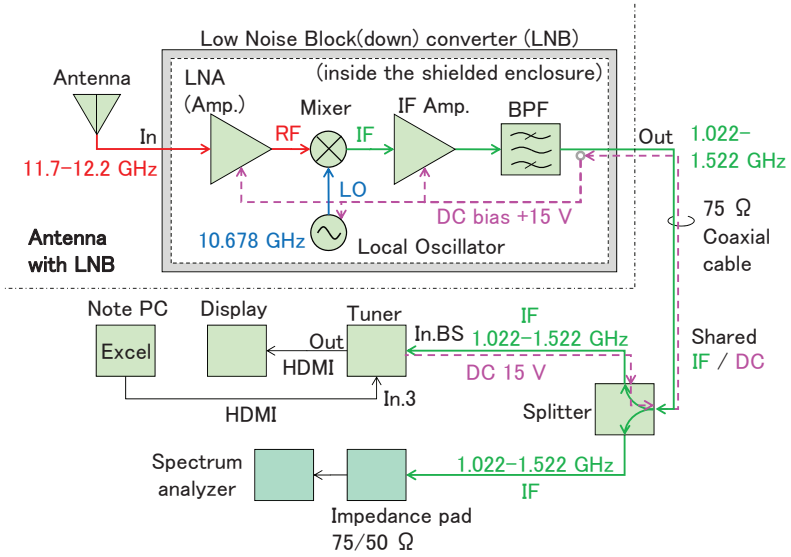
$$G = \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 \qquad (7)$$

三輪, アンテナおよび電波伝搬, 東京電機大学出版局, p.66

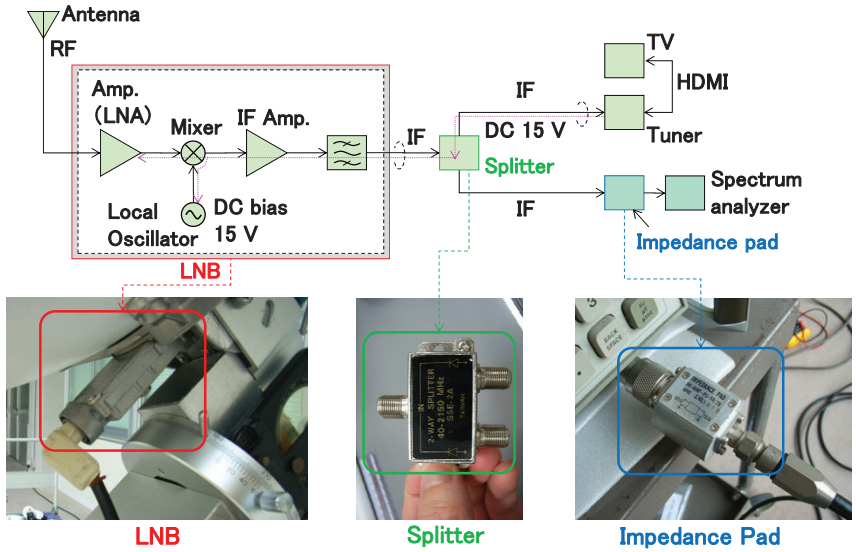
使用機材一覧

	機材名	数量	チェック	場所	備考
1	ルーネベルクレンズアンテナ	1			3基礎
2	パラボラアンテナ（LNB付き）	1		青ケース内	3基礎
3	液晶テレビ（ディスプレイのみ）	1			3基礎
4	チューナー（BS/CS/地デジ対応）	1			3基礎
5	地球儀（ブルーテラ）	1		青ケース内	1基礎
6	75Ω同軸ケーブル	3			3基礎
7	アンテナ分配器	1			3基礎
8	仰角測定器	1		青ケース内	3基礎
9	スペアナ	1			3基礎
10	電源ドラム（3端子コンセント）	1			3基礎
11	電源ドラム（2端子コンセント）	1			3基礎
12	長机	2			1基礎
13	測定値描画用ノートPC	1			1基礎
14	帽子（直射日光下で屋外測定作業が多いため）	4			工作室

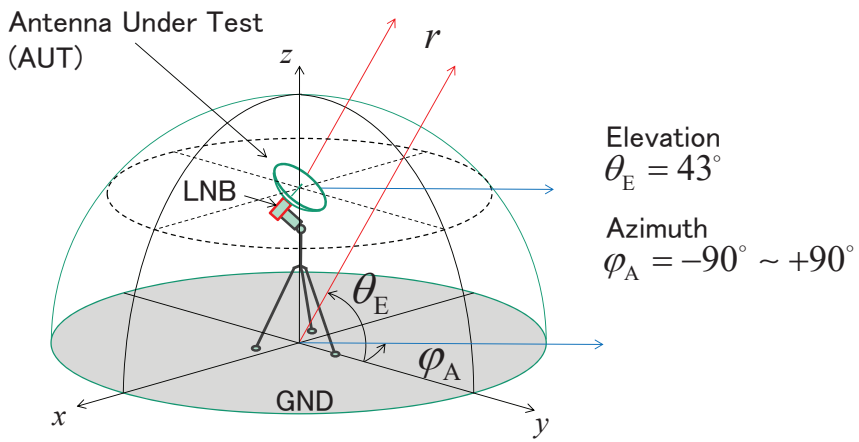
測定回路ブロック図1



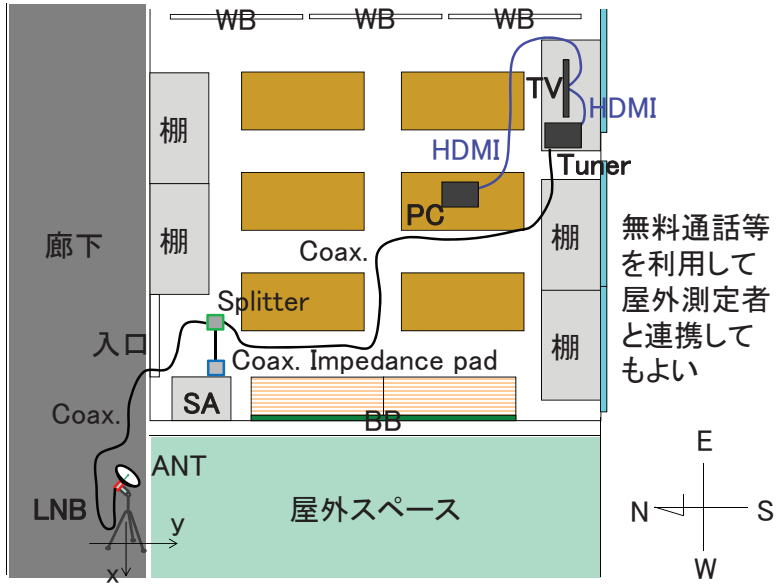
測定回路ブロック図2



アンテナ配置例1



実体配線例



TV・チューナー・アンテナ接続

スペアナ操作

1. 周波数マーカー操作

MARKER

⇒ Normal 押して

・・・ 矢印キー↑↓又は、ダイヤルを回して目的周波数に合わせる ・・・

⇒ MKR CF

2. IF帯域選択

RESBW を押して

⇒ テンキーで ３００kHz

3. トレース操作

⇒ TRACE B MaxHOLD を押して

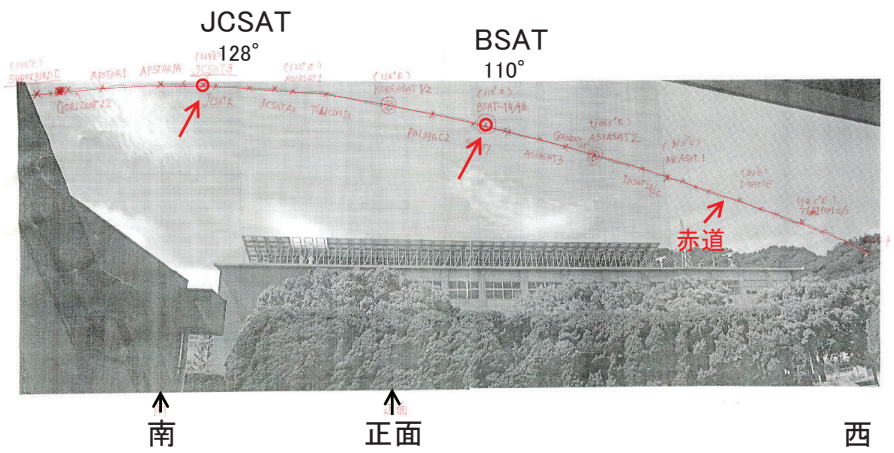
・・・ しばらく待ってから ・・・

⇒TRACE A BLANK を押して

⇒画像記録

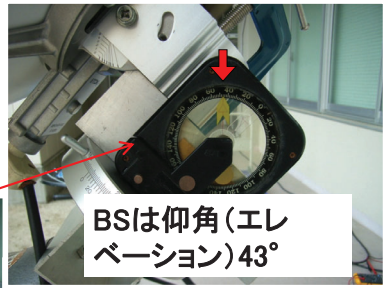
アンテナ配置例2

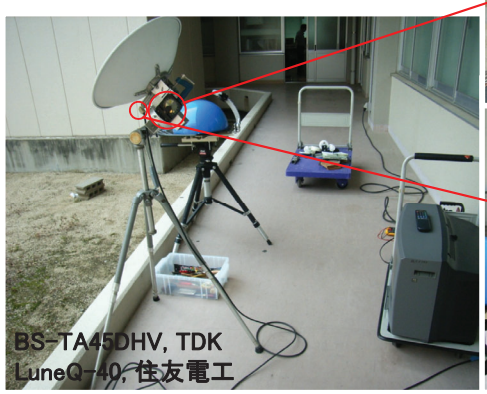
衛星マップ

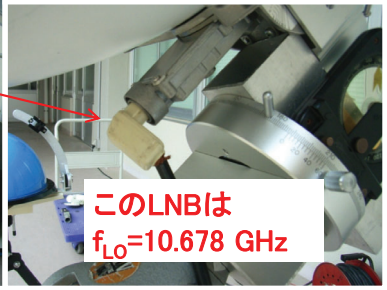


実験1. 指向性パターン測定

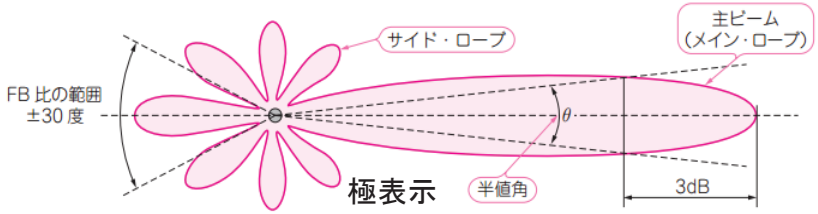
【実験】 仰角を固定したまま、方位角変化させて、受信ピークレベルの角度特性を測定する。測定結果からパラボラ、ルーネベルクレンズの半値ビーム幅を求める。

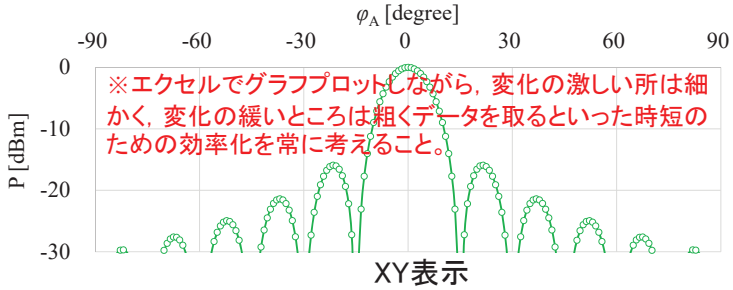






実験1. 指向性パターンの例





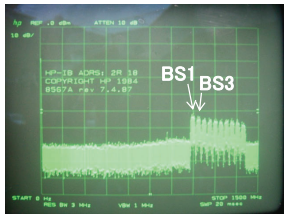
※ RFワールド No.14 ``小型/超小型アンテナの設計/製作/測定法,'' p.88 より引用

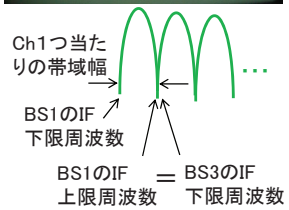
実験2. BS周波数スペクトル測定

【実験】 BSのチャンネルと周波数データを参考にして、実際のスペクトルの画像を記録し下表の値をすべて求めよ。また、ミキサで周波数を約1/10にダウンコンバートする理由を述べよ。

※ Excel計算で求める

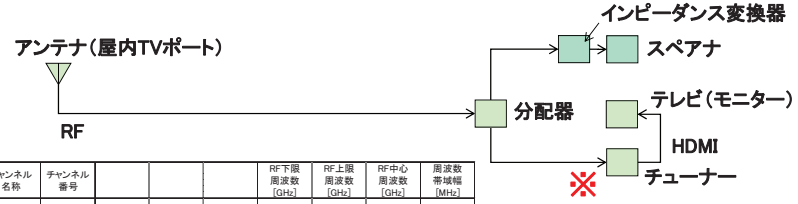
LO周波数 [GHz]	A	B	(A+B)/2	※$f_{RF}=f_{IF}+f_{LO}$			
チャンネル番号	IF下限周波数 [MHz]	IF上限周波数 [MHz]	IF中心周波数 [MHz]	RF下限周波数 [GHz]	RF上限周波数 [GHz]	RF中心周波数 [GHz]	周波数帯域幅 [MHz]
BS-1							
BS-3							
BS-5							
BS-7							
BS-9							
BS-11							
BS-13							
BS-15							
BS-17							
BS-19							
BS-21							
BS-23							





実験3. 地デジ(VHF)スペクトル測定

【実験A】 地デジスペクトルを測定せよ。ウェブで公開されている各局のスペクトル値(中心周波数・帯域幅)と比較せよ。



チャンネル名称	チャンネル番号				RF下限周波数 [GHz]	RF上限周波数 [GHz]	RF中心周波数 [GHz]	周波数帯域幅 [MHz]

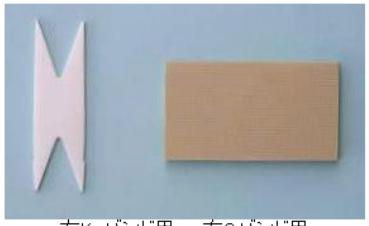
※地デジ入力ポートに接続を変更すること

実験4－1. 誘電体板の効果

【実験】 LNBフィードホーン内に誘電体板を挿入(右45° 傾斜と左45° 傾斜の2ケース)し、IF周波数スペクトルを撮影して比較せよ。スペクトルが異なる理由を考察せよ。

Q: 誘電体板の役目を教えてください。

誘電体板は円偏波を直線偏波に変換するためにフィードホンの中へ入れるものです。
円偏波は偏波軸が直交する2つの電波の片方の位相を90°遅らせ、これらをベクトル合成して円偏波にしています。
受信するときは、進んでいる方の位相を90°遅らせて同位相にすることで直線偏波に戻します。
位相を90°遅らせるために誘電体板を入れるというわけです。
ただ単にテフロン板を入れればいい、あるいはガラスエポキシ基板を入れればいいというものではありません。誘電体板の材質や大きさは使用する電波の波長(周波数の逆数)において、正しく90°遅れるように設計する必要が有ります。

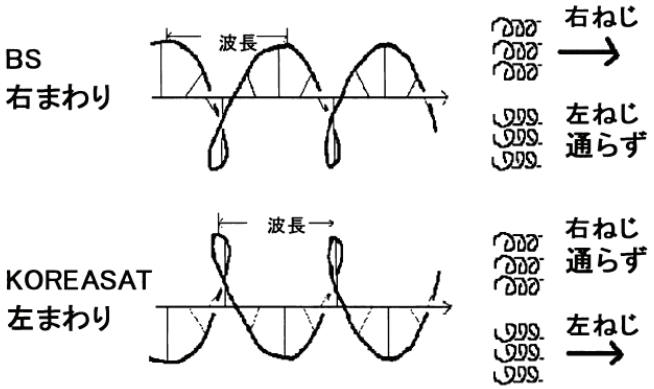


左Kuバンド用　右Cバンド用

http://www.kontec.com/teq/qanda.htm#23 より引用

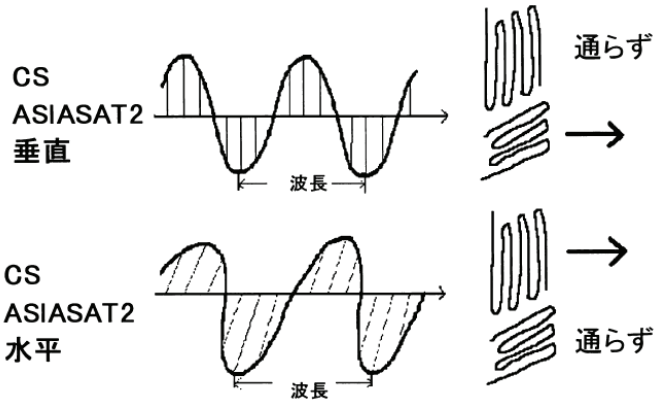
実験4－2. 偏波回転方向

針金の形状で偏波を調べる方法



偏波回転方向確認（参考）

針金の形状で偏波を調べる方法



3-1.（1）同軸線路特性インピーダンス

同軸線路の特性インピーダンスの損失が最小になる D/d の値は (1) D/d=3.591になることを確認せよ。(2) また，ε r=1.0 および ε r=2.1のときの特性インピーダンスの値を計算せよ。

ヒント：エクセルを使う方法

f(x)が最小になるためにはf'(x)がゼロ（さらに厳密にはf''(x)>0）になる点を見つければよいので、Excelで関数を描画すれば視覚的に最小値を確認することができる。f(x)とf'(x)両方を描画して最小値を確認せよ。xの刻み幅は0.001としてみよ。

参考：数値計算ソフトを使う方法

Mathematica, Scilabなどのソフトを使って、非線形方程式の解法の一つであるニュートン法を適用する。

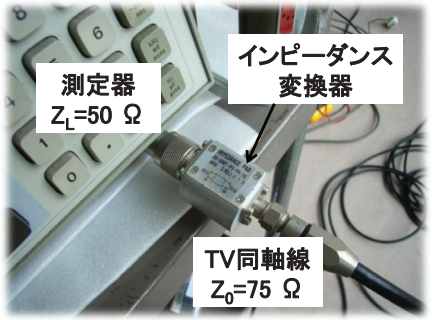
http://www.cn.kagawa-nct.ac.jp/~kusama/lecture/rflw/coaxial_impedance.pdf

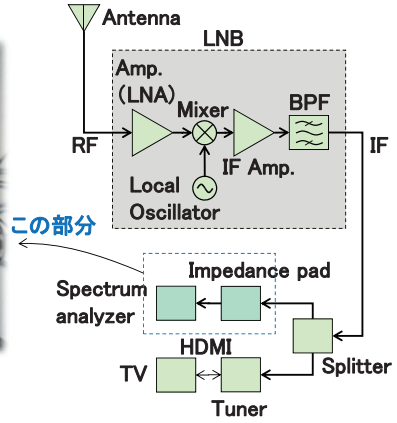
答え: (1) 略 (2) 52.9, 76.7 Ω

3-1.（2）同軸線路の損失

3-2.（1）測定器によるテレビ信号測定

入力インピーダンス50Ωのスペクトラムアナライザがある。これを特製インピーダンス75Ωの同軸線路と接続するとき、整合回路を挿入しない場合の反射係数Γとの VSWRおよび、透過係数Tはいくらになるか。また、スペアナに送られる信号電力は本来の何%か。





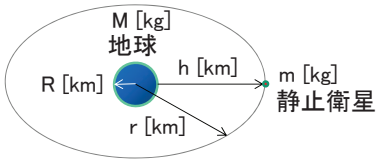
答え: −0.2, 1.5, 0.8, 96%

3-2. (2) ミキサによる周波数変換

ミキサに f_1 と f_2 の周波数を入力した場合、出力に f_1-f_2 および f_1+f_2 の周波数が出力されることを証明せよ。

3-3. (1) 衛星高度と速度の計算

静止衛星の高度hと速度vを求めよ。ただし、地球赤道半径はR=6378 km，地球質量はM=5.9724×10^{24} [kg]，万有引力定数はG=6.67408×10^{-11} [m^3 kg^{-1} s^{-2}]とする。



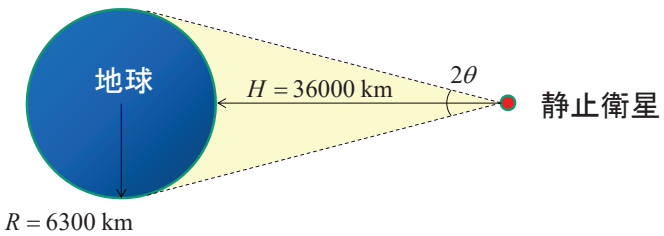
地球半径	R [km]	6378
万有引力定数	G [m3/kg/s2]	6.67408E-11
地球質量	M [kg]	5.97243E+24
	GM	3.98605E+14
自転速度	ω [rad/s]	7.27221E-05
	GM/ω2	7.5372E+22
衛星軌道半径	r [m]	42241248.08
衛星軌道半径	r [km]	42241.24808
衛星高度	h [km]	35863.24808
衛星速度	v [m/s]	3071.870246

答え:
h=35,863 km
v=3.072 km/s

3-3. (2) 通信衛星の必要最小数

衛星通信は図に示すように、赤道上空36000kmの位置に衛星を配置し、これを中継して地球上の2地点間で通信を行う方法である。この方法では (1) 1機の衛星により地球表面の何%の面積をカバーできるか。(2) また，地球全域をカバーするためには何機の衛星が必要か計算で確認せよ。

答え: (1) 42.5 % (2) 2.35 機 即ち，3機以上



鹿児嶋憲一 “光・電磁波工学” コロナ社, p.11 より引用

3-3. (3) 通信衛星からの受信電力

送信電力 100 W，アンテナ利得 37.7 dBi の放送衛星から送信される電波を直径 50 cm のパラボラアンテナで受信すると，受信電力は何 W になるか。ただし，使用周波数は f = 12 GHz，地球と衛星間の 距離は 36,000 km とし，パラボラの開口効率を η = 0.64 とする。

答え: 4.5×10^{-12} W, (−83.5 dBm)

鹿児嶋憲一 “光・電磁波工学” コロナ社, p.146 より引用

BSAT-3a,3b,3cの送信出力は各120 W程度
http://www.b-sat.co.jp/broadcasting-satellite/