

人体通信の測定技術

AMPLET



初版：2010年1月25日

株式会社アンプレット

代表取締役 社長 工学博士
東京電機大学 工学部 電気電子工学科 講師
NPO法人 ウェアラブル環境情報ネット推進機構
人体通信プロジェクト 副主査

根日屋 英之

Hideyuki Nebiya

2017/3/5

Private & Confidential

1

はじめに

AMPLET

伝送線路に人体を用いる「人体通信」に関する興味が高まってきました。しかし、その測定方法などに関しまして、あまり技術的な資料が見当たりません。また、現在、その人体通信に関する標準化の検討がいくつかの組織で行われておりますが、やはり、その情報を入手することが難しい状況です。そこで、人体通信の中で日本で普及が予想される電界方式の測定技術をまとめてみました。

人体通信の定義も、まだ明確に決まっていない段階ですので、本資料はあくまでも参考資料としてご理解いただきたいと思います。本資料には以下の内容をまとめました。

尚、本資料の著作権は株式会社アンプレットにありますので、本資料の加工による資料作製を行わないことと、参考引用されるときは、出展元(株式会社アンプレット)の明記をお願い申し上げます。

2017/3/5

Private & Confidential

2

目次

AMPLET

1. 人体通信に最適な周波数とその測定法	...	4
2. 人体に対する影響	...	18
3. 人体に流れる電流の測定と計算方法	...	24
3-1. 人体をアンテナと見立てた実効長の計算をするための基礎知識	...	25
3-2. 波長に対して十分に短い微小ダイポールアンテナからの放射	...	32
3-3. 人体をアンテナと見立てた実効長と人体を流れる電流の計算	...	39

2017/3/5

Private & Confidential

3

AMPLET

1. 人体通信に最適な周波数 とその測定法

2017/3/5

Private & Confidential

4

人体の伝送特性S21のネットワークアナライザを用いない測定法(実測)

概要

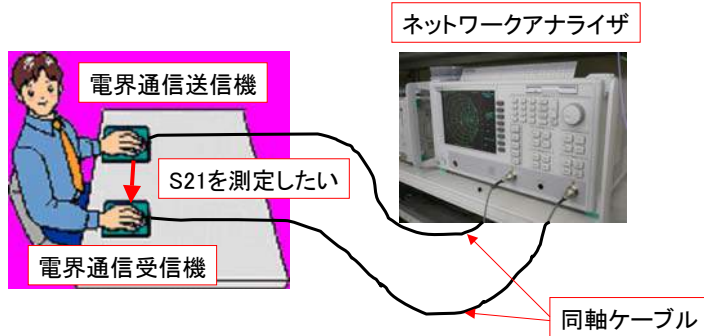
人体の伝送特性 S21の測定 : S21を測定するにはネットワークアナライザが広く用いられている。しかし、電界通信の場合は、送信機と受信機間のS21の測定でネットワークアナライザを用いると、送信機、受信機、ネットワークアナライザが、その各々を接続する同軸ケーブルで接続されてしまい、正確なS21が測定できない。

そこで、送信機内に可変周波数発信器、受信機内に広帯域電界強度測定回路を入れ、受信側の受信電界を受信機上のパネルメータに表示させ、それを目視することによりS21の測定を行った。

電界通信の人体伝送特性S21をネットワークアナライザで測定するときの問題点

AMPLET

人体を誘導媒体とする通信の実験で、電界通信送信機と受信機の各々とネットワークアナライザとを接続する同軸ケーブルが人体伝送特性S21を測定するときに、その影響は無視できない。



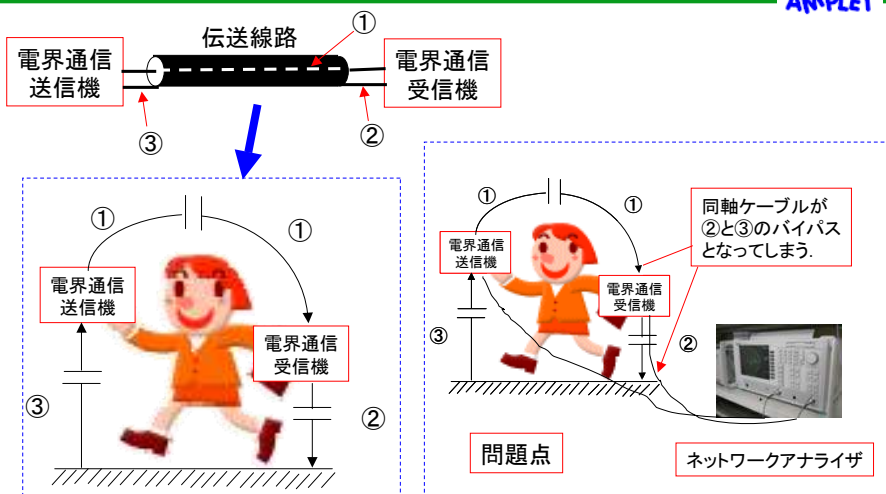
2017/3/5

Private & Confidential

7

電界通信の人体伝送特性S21をネットワークアナライザで測定するときの問題点

AMPLET



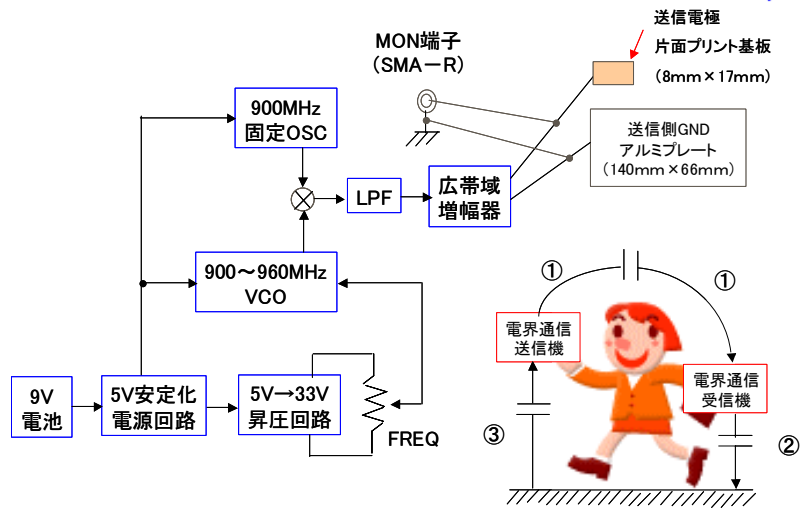
2017/3/5

Private & Confidential

8

電界通信の人体伝送特性 S21を測定する送信治具概要

AMPLET



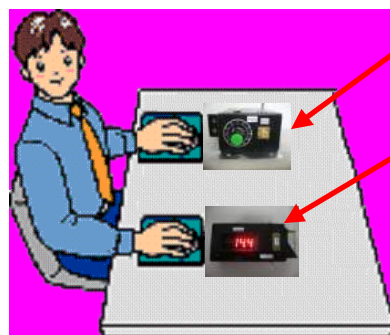
2017/3/5

Private & Confidential

9

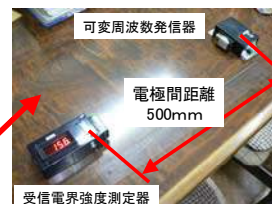
電界通信の人体伝送特性S21測定概要

AMPLET



電池で動作する
送信電極付
可変周波数発信器

電池で動作する
受信電極付
受信電界強度測定器



木製の机

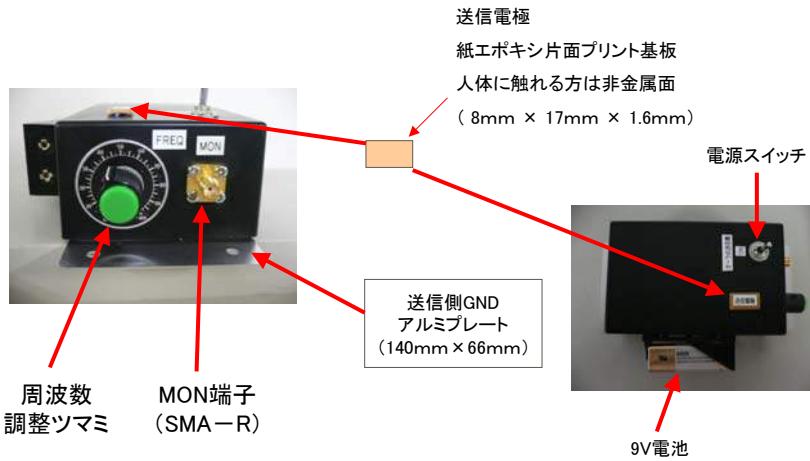
2017/3/5

Private & Confidential

10

電界通信の人体伝送特性 S21を測定する送信治具概要

AMPLET



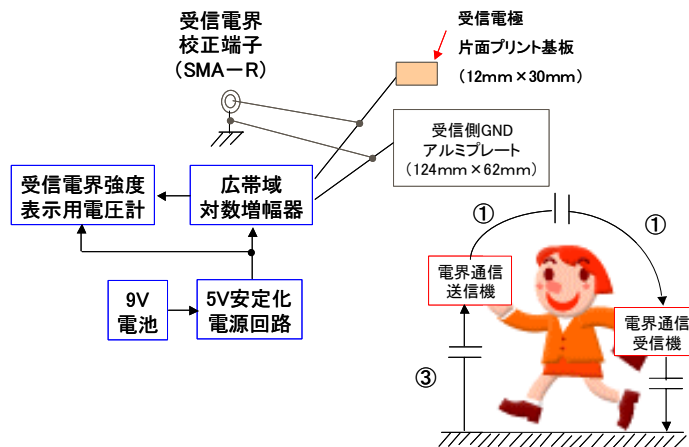
2017/3/5

Private & Confidential

11

電界通信の人体伝送特性 S21を測定する受信治具概要

AMPLET



2017/3/5

Private & Confidential

12

電界通信の人体伝送特性 S21を測定する受信治具概要

AMPLET



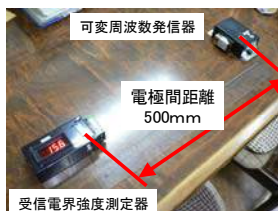
2017/3/5

Private & Confidential

13

電界通信の人体伝送特性 S21測定方法 (その1)

AMPLET



- ① 送信電極付可変周波数発信器に電池を装着し、S21を測定したい周波数が得られるように周波数調整ツマミを調整する。
- ② ①の各周波数の設定と、周波数調整ツマミのメモリの対応表を作り、各々の周波数での発振強度をMON端子とスペクトラムアナライザ(高周波電力計)で何dBmの電力が出力されているかを測定する。
- ③ 受信電極付受信電界強度測定器に電池を装着する。
- ④ 送信電極付可変周波数発信器と受信電極付受信電界強度測定器の電極中心間の距離を50cmにする。
- ⑤ 送信電極付可変周波数発信器と受信電極付受信電界強度測定器の電極に手をのせる。
- ⑥ 測定したい周波数における受信電極付受信電界強度測定器の電界強度測定電圧の数値を記録する。

2017/3/5

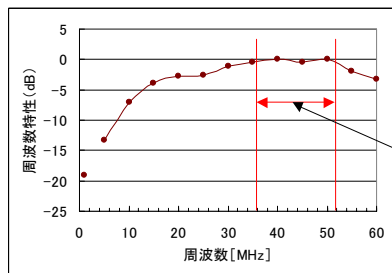
Private & Confidential

14

電界通信の人体伝送特性 S21測定方法（その2）

AMPLET

- ⑦ 受信電極付受信電界強度測定器の受信電界校正端子に信号発生器(SG)を接続し、各々の周波数で表示された数値が、何dBmの電力入力に対応しているかの変換テーブルを作成する。
- ⑧ ②の電力から⑦で得られた電力の差をとる。
- ⑨ 差の値が一番小さい周波数を0dBとして正規化し、伝送特性(S21)を得る。



電界通信
に適した
周波数帯

[注記] 人体伝送特性は電極構造や設置位置により、特性は大きく変化します。

2017/3/5

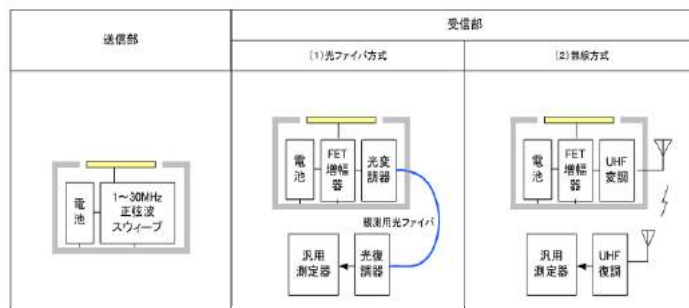
Private & Confidential

15

その他の観測ケーブルの影響を受けない実験方法案(参考)

AMPLET

人体を導線媒体とする通信の実験で、観測用のモニターケーブルの影響が無視できない恐れがある。観測用のケーブルの影響を防止し、より実環境に近い測定を行うにはケーブルレスの測定環境を用意しなければならない。ケーブルの代わりに、電磁界に影響を与えない、光ファイバの利用、あるいは被観測波形の無線伝送の方法が考えられる。これら2方式の実験セットアップの概念図を以下に示した。



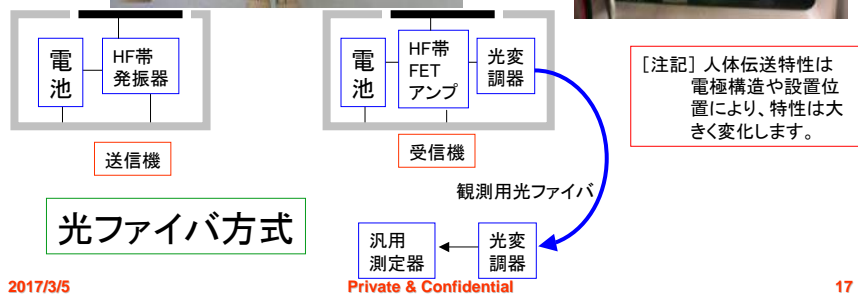
2017/3/5

Private & Confidential

16

その他の観測ケーブルの影響 を受けない実験方法

AMPLET



2017/3/5

Private & Confidential

17

AMPLET

2. 人体に対する影響

2017/3/5

Private & Confidential

18

人体に対する影響

AMPLET

- 人体は大きな誘電体と考えられるので、電界により人体と機器間は結合し電流が流れる。(千葉大学 伊藤公一氏の研究では、体内にはほとんど電流は流れず、人体体表を流れるという研究発表がある。)
- 非接触ICカード(125kHz, 131kHz, 13.56MHzなど)の通信では磁界による通信も行われているが、磁界は人体にはほとんど影響しないので通信には影響は少ないと考えられている。しかし、磁界は人体内部にまで入り込み誘導電界を発生させ、埋め込み機器を誤動作させることも考えられる。
- 人体は低周波から数MHzまでは、ほぼ導体と考えてよいので、電界は人体組織内部まで入り込んでいないという考え方もできる。
- 人体の共振周波数は、接地状態で30MHz、非接地状態で70MHz程度。

参考文献：「電界カップリングによる人体通信機器に関する暴露評価」、首都大学東京 多氣昌生氏、鈴木敬久氏、東京都立大学 渡辺恭平氏、信学技報、EMCJ2007-47

2017/3/5

Private & Confidential

19

電波の医療機器等への影響に関する調査研究報告書

AMPLET

- 無線通信機器がペースメーカーなどの医療機器に対して及ぼす影響については、総務省が公開している「電波の医療機器等への影響に関する調査研究報告書」が参考になる。

www.soumu.go.jp/s-news/2007/pdf/070424_5_bt2.pdf

からダウンロードできる。

- 参考文献として、「電界カップリングによる人体通信機器に関する暴露評価」、首都大学東京 多氣昌生氏、鈴木敬久氏、東京都立大学 渡辺恭平氏、信学技報、EMCJ2007-47 などがある。

2017/3/5

Private & Confidential

20

人体に対する影響に関する国内の指針

AMPLET

国内では、総務省の

- 電磁防護指針 ⇒ 電気通信技術審議会答申、「電波利用における人体の防護指針」、諮問第38号、1990年
- 100kHz以上は局所吸収指針 ⇒ 電気通信技術審議会答申、「電波利用における人体防護の在り方」、諮問第89号、1997年 ←(人体通信)

が該当すると思われる。共に、

<http://www.tele.soumu.go.jp/j/ele/body/protect/index.htm>

からダウンロードできる。局所吸収指針の制限値は、被吸収率（SAR : Specific Absorption Rate）が任意の組織 10g 平均で、 $2[W/kg]$ を超えないこととなっている。

2017/3/5

Private & Confidential

21

人体に対する影響に関する国際的な指針

AMPLET

国際的には

- 国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP : International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection）のガイドライン

「Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields」, Health Phys., Vol.74, pp.494~522, 1998年

が該当すると思われる。

www.icnirp.de/documents/emfgdl.pdf

からダウンロードできる。SARの制限値は $2[W/kg]$ を超えないとなっており総務省と同じであるが、ICNIRP では誘導電流密度も評価している。日本でも誘導電流密度による評価の検討が始まった。

2017/3/5

Private & Confidential

22

人体に対する影響に関する国際的な指針

AMPLET

- 国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP : International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) のガイドライン

	周波数 [Hz]	導電率 σ [S/m]	密度 ρ [kg/m ³]	誘導電流密度 J_{max} [A/m ²]	SARmax [W/kg]	内部電界 E(J) [V/m]	SAR電界 E(SAR) [V/m]
筋肉	100k	0.36	1000	0.2	2	0.56	74.5
	1M	0.5	1000	2	2	4.00	63.2
	10M	0.62	1000	20	2	32.26	56.8
脂肪	100k	0.024	1000	0.2	2	8.33	288.7
	1M	0.025	1000	2	2	80.00	282.8
	10M	0.029	1000	20	2	689.66	262.6

$$\begin{cases} SAR = \frac{\sigma |E|^2}{2\rho} \\ J = \sigma E \end{cases}$$

2017/3/5

Private & Confidential

23

AMPLET

3. 人体に流れる電流の測定と計算方法

2017/3/5

Private & Confidential

24

予備知識 その1

AMPLET

3-1. 人体をアンテナと見立てた実効長の計算をするための基礎知識

2017/3/5

Private & Confidential

25

実効輻射電力

EIRP : Effective Isotropically Radiated Power

AMPLET

球面において、各部の電力密度 P_d [W/m²] を全球面で積分すると放射源の電力と等しくなる。電界強度を E 、磁界を H 、自由空間のインピーダンスを 120π (= 377) [Ω] とすると、 $E = 120\pi H$ なので、

$$P_d = EH = \frac{E^2}{120\pi} = 120\pi H^2$$

となる。等方性アンテナは、 P_d はどの点でも等しい。ここで、半径 = r の球では、その表面積 S は $4\pi r^2$ なので、

$$P = 4\pi r^2 P_d$$

となる。これは、アイソトロピックアンテナの電界強度と輻射電力の関係となる。

2017/3/5

Private & Confidential

26

アイソトロピックアンテナの 電界強度と輻射電力の関係

AMPLET

前のページより,

$$P_d = \frac{P}{4\pi r^2} = \frac{E^2}{120\pi} = 120\pi H^2$$

となるので, 電界強度は,

$$E^2 = 120\pi \frac{P}{4\pi r^2} = 30 \frac{P}{r^2}$$

$$\therefore E = 5.48 \frac{\sqrt{P}}{r}$$

と求まる.

2017/3/5

Private & Confidential

27

アイソトロピックアンテナの 磁界と輻射電力の関係

AMPLET

前のページより,

$$P_d = \frac{P}{4\pi r^2} = \frac{E^2}{120\pi} = 120\pi H^2$$

となるので, 磁界は,

$$H^2 = \frac{1}{120\pi} \frac{P}{4\pi r^2} = \frac{1}{4738} \frac{P}{r^2}$$

$$\therefore H = \frac{1}{68.83} \frac{\sqrt{P}}{r}$$

と求まる.

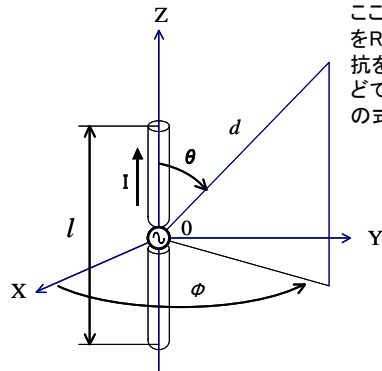
2017/3/5

Private & Confidential

28

微小ダイポールアンテナ の利得は 1.76dBi (1.5倍)

AMPLET



微小ダイポールアンテナの場合、その利得は、Dr. John Klaus の文献より、1.76dBi (=1.5倍)となっている。ここで、アンテナの放射効率を η 、アンテナの放射抵抗を R_a (本資料のスライド番号50ページを参照)、損失抵抗を R_L (オーミックロス、銅損、ハンダ付け、表皮効果などで1~2Ω程度)とすると、電界強度、磁界強度は以下の式となる。

$$\begin{cases} E_{sdp} = 6.71\eta \frac{\sqrt{P}}{r} \\ H_{sdp} = \frac{\eta}{56.2} \frac{\sqrt{P}}{r} \\ \eta = \frac{R_a}{R_a + R_L} \end{cases}$$

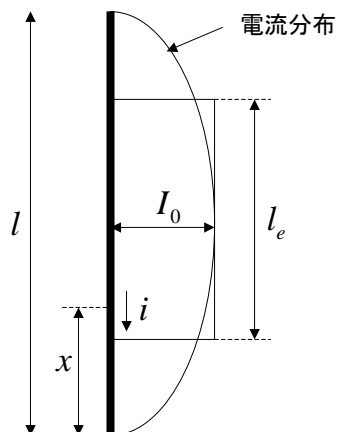
2017/3/5

Private & Confidential

29

アンテナの実効長(実効高)

AMPLET



長さ l [m]の線状アンテナにアンテナの電流分布の腹で I_0 [A]が給電されている場合、先端から距離 x [m]の場所で、電流 i [A]が流れているとする。線状の電流分布曲線で囲まれている面積と等しい長方形の一辺の長さ l_e [m]をアンテナの実効長(実効高)という。

$$\int_0^l i dx = l_e I_0$$

2017/3/5

Private & Confidential

30

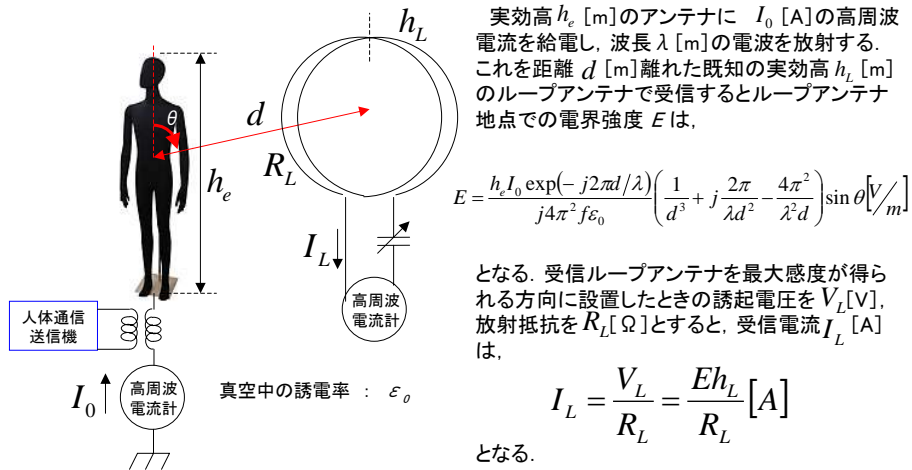
3-2. 人体をアンテナと見立てた実効長 と人体を流れる電流の計算

予備知識 その2

3-2. 波長に対して十分に短い微小 ダイポールアンテナからの放射

人体をアンテナと見立てた実効長(実効高) (一般解)

AMPLET



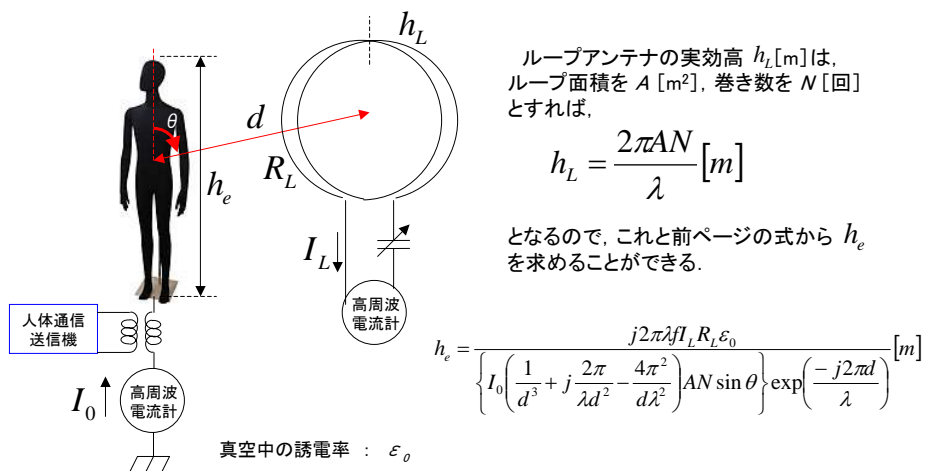
2017/3/5

Private & Confidential

33

人体をアンテナと見立てた実効長(実効高) (一般解)

AMPLET



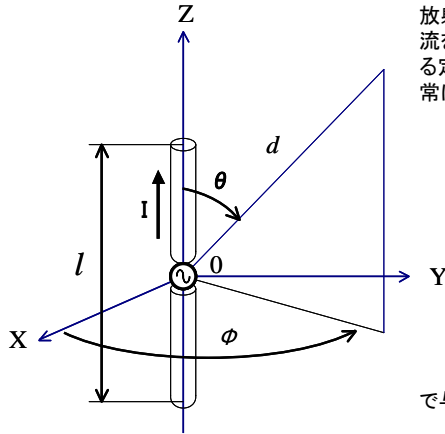
2017/3/5

Private & Confidential

34

微小ダイポールアンテナからの放射界

AMPLET



左図に示す座標系におけるダイポールアンテナの放射電磁界を以下に示す。長さの導線に流れる電流を I 、真空中の誘電率を ϵ_0 、 k は波数と呼ばれる定数 $k = \lambda / (2\pi)$ である。 l が波長に対して非常に短い微小ダイポールアンテナの電界と磁界は、

$$\begin{cases} E_R = \frac{Il \exp(-jkd)}{j2\pi\omega\epsilon_0} \left(\frac{1}{d^3} + \frac{jk}{d^2} \right) \cos\theta \\ E_\theta = \frac{Il \exp(-jkd)}{j4\pi\omega\epsilon_0} \left(\frac{1}{d^3} + \frac{jk}{d^2} - \frac{k^2}{d} \right) \sin\theta \\ H_\phi = \frac{Il \exp(-jkd)}{4\pi} \left(\frac{1}{d^2} + \frac{jk}{d} \right) \sin\theta \\ E_\phi = H_R = H_\theta = 0 \end{cases}$$

で与えられる。

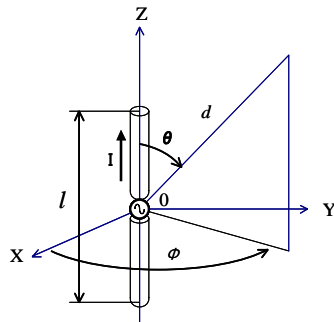
2017/3/5

Private & Confidential

35

微小ダイポールアンテナからの放射界

AMPLET



ダイポールアンテナの放射界は、 $1/d^3$ 、 $1/d^2$ 、 $1/d$ の3項よりなりたつことがわかる。これらは各々以下の意味を持つ。

$1/d^3$ に比例する項は準静電界 (Quasi Static Field) と呼ばれ、静電界における双極子 (ダイポール) による電界と等価になる。

$1/d^2$ に比例する項は誘導電磁界 (Induction Field) と呼ばれ、ビオ・サバルの法則に従う誘導界。

$1/d$ に比例する項を放射電磁界 (Radiation Field) と呼ばれ、アンテナから空間に電力を放射するのに寄与する成分である。

$$E_\theta = \frac{Il \exp(-jkd)}{j4\pi\omega\epsilon_0} \left(\frac{1}{d^3} + \frac{jk}{d^2} - \frac{k^2}{d} \right) \sin\theta$$

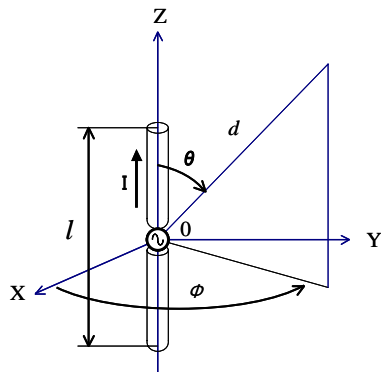
2017/3/5

Private & Confidential

36

微小ダイポールアンテナからの放射界

AMPLET



これらの電界の振幅は、 $d = \lambda / (2\pi)$ で一致する。下表に、 $d = \lambda / 100$, $d = \lambda / (2\pi)$, $d = 5\lambda$ の3距離で電界の振幅を比較する。この結果からもわかるように、

- ・ $d \ll \lambda / (2\pi)$ では準静電界
- ・ $d \gg \lambda / (2\pi)$ では放射電磁界が支配的になる。

d	準静電界	誘導電磁界	放射電磁界
$\lambda / 100$	1	0.063	0.0039
$\lambda / (2\pi)$	1	1	1
$\lambda / 5$	0.001	0.032	1

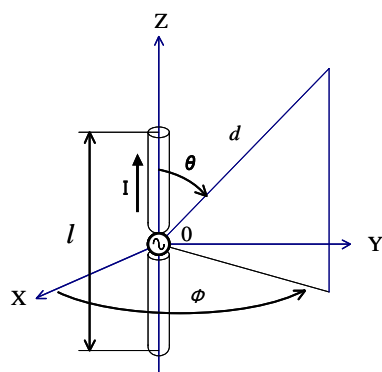
2017/3/5

Private & Confidential

37

微小ダイポールアンテナの放射電力と放射抵抗

AMPLET



参考までに微小ダイポールアンテナの放射電力 P と放射抵抗 R_a は、真空中の透磁率を μ_0 とすると、次の式で求められる。

$$\begin{cases} P = \frac{\pi\omega\mu_0}{3} \left(\frac{Il}{\lambda}\right)^2 \\ R_a = \frac{2\pi\omega\mu_0}{3} \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 \end{cases}$$

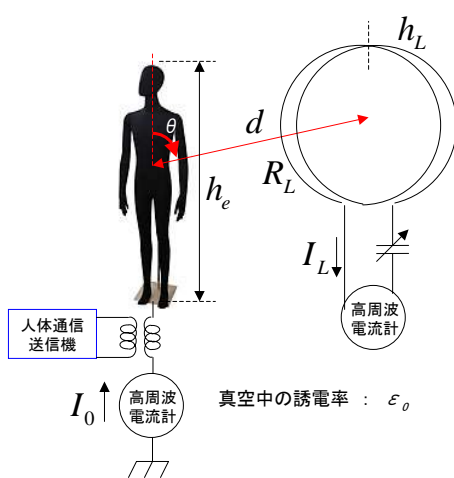
2017/3/5

Private & Confidential

38

3-3. 人体をアンテナと見立てた実効長 と人体を流れる電流の計算

人体をアンテナと見立てた実効長(実効高) (他の無線システムとの干渉を検討する遠方界...近似式)



実効高 h_e [m] のアンテナに I_0 [A] の高周波電流を給電し、波長 λ [m] の電波を放射する。これを距離 d ($\gg \lambda$) [m] 離れた既知の実効高 h_L [m] のループアンテナで受信するとループアンテナ地点での電界強度 E は、

$$E = \frac{120\pi h_e I_0}{\lambda d \epsilon_0} \sin \theta \left[\frac{V}{m} \right]$$

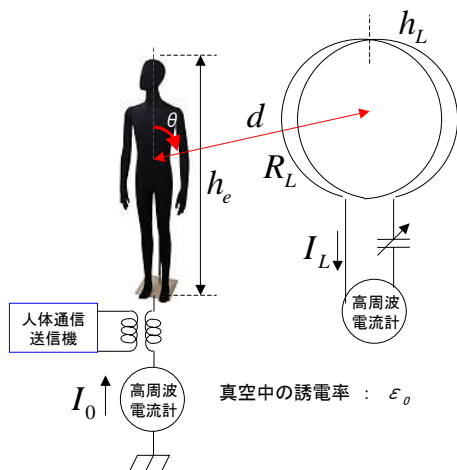
となる。受信ループアンテナを最大感度が得られる方向に設置したときの誘起電圧を V_L [V]、放射抵抗を R_L [Ω] とすると、受信電流 I_L [A] は、

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{E h_L}{R_L} [A]$$

となる。

人体をアンテナと見立てた実効長(実効高) (他の無線システムとの干渉を検討する遠方界...近似式)

AMPLET



ループアンテナの実効高 h_L [m] は、ループ面積を A [m²]、巻き数を N [回] とすれば、

$$h_L = \frac{2\pi AN}{\lambda} [m]$$

となるので、これと前ページの式から h_e を求めることができる。

$$h_e = \frac{\lambda^2 d I_L R_L \epsilon_0}{240\pi^2 I_0 AN \sin \theta} [m]$$

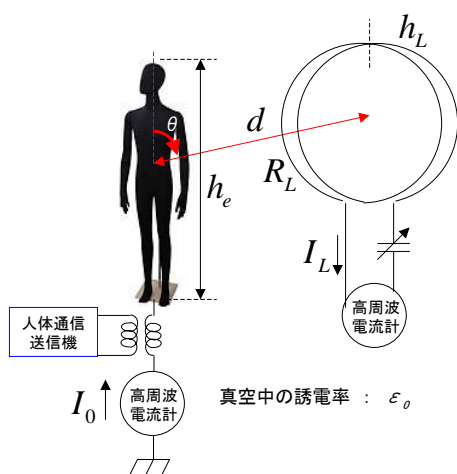
2017/3/5

Private & Confidential

41

人体をアンテナと見立てた実効長(実効高) (人体通信ができるかを検討する近傍界解析...近似式)

AMPLET



実効高 h_e [m] のアンテナに I_0 [A] の高周波電流を給電し、波長 λ [m] の電波を放射する。これを距離 d ($\ll \lambda$) [m] 離れた既知の実効高 h_L [m] のループアンテナで受信するとループアンテナ地点での電界強度 E は、

$$E = \frac{30\lambda h_e I_0}{\pi d^3 \epsilon_0} \sin \theta [V/m]$$

となる。受信ループアンテナを最大感度が得られる方向に設置したときの誘起電圧を V_L [V]、放射抵抗を R_L [Ω] とすると、受信電流 I_L [A] は、

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{E h_L}{R_L} [A]$$

となる。

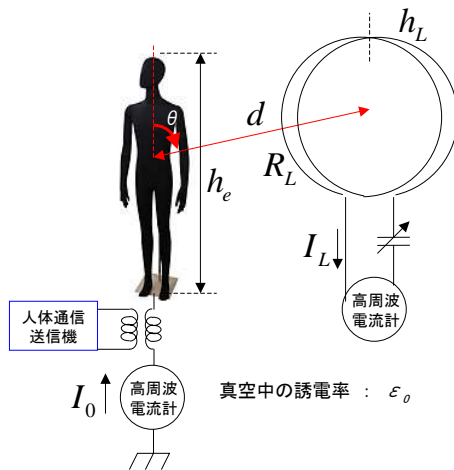
2017/3/5

Private & Confidential

42

人体をアンテナと見立てた実効長(実効高) (人体通信ができるかを検討する近傍界解析...近似式)

AMPLET



ループアンテナの実効高 h_L [m] は、
ループ面積を A [m²]、巻き数を N [回]
とすれば、

$$h_L = \frac{2\pi AN}{\lambda} [m]$$

となるので、これと前ページの式から h_e
を求めることができる。

$$h_e = \frac{\lambda d^3 I_L R_L \epsilon_0}{60\pi I_0 AN \sin \theta} [m]$$

2017/3/5

Private & Confidential

43