

**第一級
陸上特殊
無線技士
無線工学
テキスト**

目次

まえがき	5
1. 工学計算の基礎知識	6
2. マイクロ波の性質	8
3. 静止衛星通信	12
4. 多重通信の基礎	16
5. OFDMA方式の概要	20
6. OFDM方式の詳細	24
7. CDMA方式の概要	27
8. 変調方式の基本	30
9. QAM変調方式	33
10. PSK変調・復調方式	36
11. MIMO	39
12. ダイバーシティ方式	41
13. VSATシステム	44
14. マイクロ波の中継方式	46
15. アナログ信号のデジタル化	49
16. 帯域フィルタ	53
17. PLL回路	55
18. デジタル無線通信の誤り制御	58
19. デシベル計算	60
20. 雑音指数	66
21. 等価雑音温度	69
22. パルスレーダー	72
23. ドップラーレーダー	82
24. 通信速度の計算	84

25. 半導体の基礎	86
26. さまざまな半導体素子	90
27. 同軸ケーブル	95
28. 導波管	98
29. 導波管窓	103
30. VSWR	106
31. 方向性結合器	110
32. 分岐導波管	112
33. サーキュレータ	116
34. 進行波管	119
35. マグネトロン	121
36. VHF・UHF帯用無指向性アンテナ	124
37. 八木アンテナ	129
38. 反射鏡アンテナ	132
39. コーナーリフレクターアンテナ	137
40. スロットアレーアンテナ	140
41. 電波の自由空間伝搬損失	142
42. 電波の見通し距離	144
43. ナイフエッジ	150
44. VHF帯の電波伝搬性質	154
45. M曲線	158
46. フェージング	161
47. アイパターン	164
48. 二次電池	168
49. 伝送符号形式	177

50. 論理回路	181
51. 抵抗の組み合わせ回路	185
52. テブナンの定理・重ね合わせの原理	190
53. RLC回路	192
54. LC共振回路	197
55. 各種測定装置	199
56. 周波数カウンタ	203
57. オペアンプ回路	205
58. 倍率器・分流器	208
59. ビット誤り率の測定	211
60. 受信機における雑音・混信	214
61. FM送信機の変調指数	218
62. アンテナの絶対利得と相対利得	222

まえがき

電波を用いた無線通信の恩恵を受けていないという人は、おそらく皆無といってもよいでしょう。当たり前に使っている携帯電話やスマートフォン、テレビにラジオ、無線LANなどは、全て無線通信の技術を応用したものです。

電波は目に見えないため、規格外の周波数の電波を出していたり、違法な大出力を出していたりしても、即座にそれとは分かりません。しかし、そのような違法な電波が、消防・救急などをはじめとした人命救助の連絡通信や、航空機の離着陸の連絡に使われている電波などを妨害することがあれば、それは人命にかかわる重大な事態となってしまいます。そこで、我が国では電波法をはじめとした法律が整備され、電波の適正な利用と、それを取り扱う無線従事者に求められる法的・技術的要件などについて規定しています。

本書は、23種類ある無線従事者国家資格の中でも、もっとも社会的需要が高いといえる第一級陸上特殊無線技士(略称：一陸特)の国家試験受験参考書として執筆しました。一陸特の守備範囲は、警察・消防・鉄道・タクシーなどの無線基地局、テレビ局などの中継設備、陸上レーダー、自治体などの防災無線設備、衛星通信の基地局、そして携帯電話設備の設計や保守業務など、私たちの身の回りに欠かすことができない無線設備のかなりの範囲を占めています。そのため有資格者のニーズは高く、年間受験者数も1万人程度と多いですが、出題される分野が広く、ある程度の専門的知識が求められるため、合格率は30%程度と決して高くはありません。

しかし、一陸特の国家試験問題は、決まったパターンがあります。さらに上級の陸上無線技術士では、電波理論に関する微分方程式の詳細な知識などが求められますが、一陸特はそのような問題は出題されず、中学校で勉強するオームの法則程度の基礎知識があれば十分合格可能です。本書で解説している事項を理解し、練習として過去数年分の国家試験過去問題を解くことにより、必ずや合格できるものと確信しています。是非とも一度の試験で合格を手にし、またさらに上級の陸上無線技術士への足掛かりとして頂くことができれば幸いです。

1

工学計算の 基礎知識

一陸特の国家試験を受験するにあたって、四則演算のほか、最低限必要と思われる計算に関する基礎知識をまとめました。

1 補助単位

1kmのk(キロ)のように、ゼロの数を省略するために付け加えられる記号を補助単位といいます。

以下に主なものを挙げます。

d(デシ)	……… 10^1 、10倍
k(キロ)	……… 10^3 、1000倍
M(メガ)	……… 10^6 、1000000倍
G(ギガ)	……… 10^9 、1000000000倍
T(テラ)	……… 10^{12} 、1000000000000倍
m(ミリ)	……… 10^{-3} 、0.001倍
μ (マイクロ)	… 10^{-6} 、0.000001倍
n(ナノ)	……… 10^{-9} 、0.000000001倍

2 周波数と時間の関係

ある波形が1秒間にf回繰り返すとき、その周波数をfヘルツ[Hz]といいます。

また、時間的に繰り返す波形の1回に掛かる時間(秒)を周期(T)といい、1秒間に1/T回繰り返すことから、この波形の周波数は1/Tヘルツとなります。

以上のことより、周波数fと周期Tは反比例の関係があり、 $f \times T = 1$ となります。

3 電波の波長

周期的に繰り返す信号が、ある一定の速度で進んでいるとします。このとき、繰り返しの1回分の間に進む距離を波長といいます。電磁波が進む速度は光の速さと同じで、1秒間に30万km(3×10^8 m/s)です。したがって、1秒間に 3×10^8 回繰り返す電波(=300MHz)の波長は1mです。

電波の速度をc、波長を λ 、周波数をfとすると、 $f \times \lambda = c$ の関係があります。

指数・対数

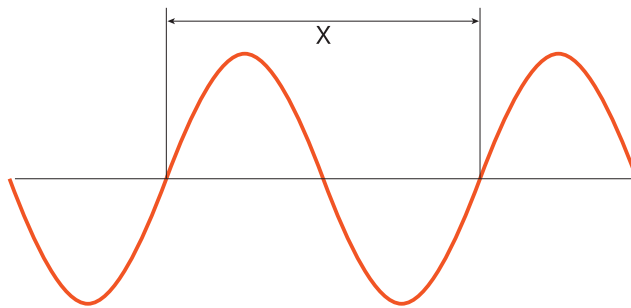
非常に大きな数や小さな数を表すとき、補助単位を使うというのもひとつの手ですが、「10の何乗か」で表す方法もあります。 $10^1 = 10$ 、 $10^9 = 1000000000$ ですから、1~9の数字で1億倍の範囲を表すことができます。これを指数表記といいます。

「10000000は10の何乗か」を求める計算は対数といい、 \log という記号で表現します。例として10000000から7を求める場合、 $7 = \log_{10} 10000000$ と表します。 \log の右下の小さい10は、「10の何乗か」を意味しています。

2 マイクロ波の性質

電磁波(電波)は、空気中や真空中を交流の電気が伝わる現象です。交流というのは、プラス・マイナスが時間によって入れ替わる電気のことです。実は、交流の電流が流れている場所には、必ず電波が発生することが分かっています。私たちの身の回りにあるコンセントには50Hzや60Hzの電気が来ていますので、コンセントにつながる配線からも50Hzや60Hzの電波が放射されていることとなります。

一陸特の資格保持者が取り扱う電波は、主にマイクロ波と呼ばれる周波数のものです。マイクロ波とは、その波長(ゼロ→+→ゼロ→マイナス→ゼロと一周期変化する間に進む距離。下図においてxの長さ)が1mから1mm、周波数にして300MHz~300GHz付近の電波を指します。



この周波数帯の電波は、とても通信に使いやすい性質を持っているので、電波通信のメインバンドとなっています。

電波の基本的な性質を挙げてみましょう。まず、周波数が低くなるほど、次のような性質が現れます。

1. アンテナや装置が大きくなる。逆に言えば、アンテナの大きさが一定であれば、周波数が低いほどアンテナの性能は悪くなる。
2. 電波の飛び方が音と似てくる。つまり、物陰にも回り込んでいくので、直接見通せない場所とも通信しやすくなる。
3. 電波にたくさんの情報を乗せられなくなる。たとえば、電波の周波数の1%の幅の情報を乗せることができるとすると、10MHzの電波には100kHz幅の信号しか乗せられないが、1GHzの電波には10MHz幅の信号を乗せることができる。
4. 太陽や宇宙から飛んでくる雑音の影響を大きく受ける。これらは自然雑音といい、原則として周波数が低いほど大きくなる性質がある。

5. 遠くまで減衰せずに飛んでいく。特に短波帯と呼ばれる低い周波数では、上空にある電離層と地上との間で反射を繰り返す、状況によっては地球を数周して電波が飛ぶことすらある。

周波数が高いと、これとは逆の性質が現れます。すなわち、

1. アンテナや装置が小さくなる。逆にいうと、小さいアンテナでも、周波数を高くするほど高性能なものを作ることができる。
2. 電波の飛び方が光と似てくる。物陰には回り込まず、水面や鏡で反射するなど光とよく似た飛び方をする。
3. 電波にたくさんの情報を乗せられるようになる。したがって、ひとつの周波数に数百、数千人の電話の通話を乗せることもできるようになる。
4. 自然雑音が小さくなり、雑音の影響を受けにくくなる。
5. 空気中の塵や雨粒、雪などによる減衰が大きくなる。

などの特性が現れます。

例題

次の記述は、マイクロ波(SHF)帯を利用する通信回線又は装置の一般的な特徴について述べたものである。カッコ内に入れるべき正しい語句を答えよ。

- ① 周波数が[1]くなるほど、雨による減衰が大きくなり、大容量の通信回線を安定に維持することが難しくなる。
- ② 低い周波数帯よりも必要とする周波数帯域幅が[2]く取れるため、多重回線の多重度を大きくすることができる。
- ③ 周波数が高くなるほど、アンテナが[3]型になり、また、大きなアンテナ利得を得ることが容易である。

解答と解説

1:高 2:広 3:小

例題

次の記述は、マイクロ波(SHF)帯を利用する通信回線又は装置の一般的な特徴について述べたものである。このうち正しいものをひとつ選べ。

- ① 周波数が高くなるほど、雨による減衰が小さくなり、大容量の通信回線を安定に維持することが容易になる。
- ② アンテナの大きさが同じとき、周波数が高いほどアンテナ利得は小さくなる。
- ③ 低い周波数帯よりも必要とする周波数帯域幅が広く取れるため、多重回線の多重度を大きくすることができる。
- ④ 低い周波数帯よりも自然雑音および人工雑音の影響が大きく、良好な信号帯雑音比(S/N)の通信回線を構成することができない。

解答と解説

③

電波は、周波数が高くなるほど波長が短くなり、10GHz程度を超えると雨粒による影響が無視できなくなるため、使用する周波数は状況に応じて使い分けています。また、アンテナの大きさが一定のとき、波長が短いほど相対的なアンテナの大きさが大きくなり、高利得を得ることができます。

自然雑音や人工雑音などは、主に長波から短波帯にかけて分布し、超短波や極超短波になると小さくなります。したがって、マイクロ波では良好なS/N比を得ることができます。

3

静止衛星通信

人工衛星を使った衛星通信を利用したことがない方はいらっしゃるでしょうか？最も直接的でわかりやすいのは、衛星電話を使った国際電話。「もしもーし」と呼びかけても相手からの返事が少し遅れるアレです。国際電話なんて使ったことがないという方が殆どだとは思いますが、海外からのオリンピック中継やニュース中継などで、静止衛星を介した中継は目にされていることでしょう。

人工衛星というのは、地球の周囲を回る電波中継局です。地上から衛星に向けて電波を発射すると、それを受信した衛星は周波数を変えて(同一周波数では混信してしまうため)地上に送り返すことで、大陸間を超えた長距離の電波中継を可能としています。

ここで質問。人工衛星は、どうして宇宙に浮かんでいられるのでしょうか？どうして地球に落ちてこないのでしょうか？

実は、人工衛星は常に地球に向けて落下しているのです。しかし同時に、円周上を運動する物体は遠心力を受けます。人工衛星が地球に引かれて落下する力と遠心力が同じ大きさだったとすると、その人工衛星は地球の表面に落下することもなければ、遠心力で地球から離れていくこともなく、延々と地球の周りを回り続けます。これが、人工衛星が同じ位置に浮いていられる理由です。

寿命を迎えた人工衛星がいつまでもその場所に留まっているのは好ましくないので、寿命末期になった人工衛星は、残りの燃料で地球の外側に向けて移動させます。すると地球の引力が小さくなり、長い時間をかけて地球から離れていき、やがて宇宙の藻屑となるのです。これを墓場軌道と呼んでいます。

このような理由により、静止衛星の軌道は高すぎても低すぎてもダメで、ある一定の高さに決定されます。また、地上と衛星との間に使用される電波は、光のように直進性が強くて大量の情報を乗せられる高い周波数のマイクロ波が用いられます。静止衛星の特徴を次にまとめます。

● 静止軌道は、赤道上空約36000kmの高さにある。

- 電波は1秒間に30万kmの速さで伝わるため、往復で0.25秒遅延する。
- 理論的には、等間隔に3個の衛星を配置すれば、地球上ほとんどの場所からアクセス可能となる。
- 太陽電池で稼働するが、春分・秋分のころ地球の影になる時間があるため蓄電池を搭載している。発電できない間は蓄電池で動作している。
- 周波数帯は、4～8GHzのCバンド、12～18GHzのKuバンド、18～26GHzのKバンド、26～40GHzのKaバンドなどが主に使用されている。

マイクロ波のバンドというのは、一定の周波数で区切られた帯域のことで、L・S・C・X・Ku・K・Ka・V・Wなどのアルファベットで区切られています。衛星通信については、上に挙げたものを知っていればよいでしょう。

例題

次の記述は、一般に衛星通信に使用されている周波数について述べたものである。
カッコ内の字句について正しいものを選び。

- ① 衛星通信では、送信地球局から衛星へのアップリンク用の周波数と衛星から受信地球局へのダウンリンク用の周波数が対で用いられる。例えばCバンドでは6GHz帯と[4・12]GHz帯が用いられている。
- ② 衛星からの送信電力には限りもあり、ダウンリンクの周波数には、アップリンクよりも[定在波比・伝搬損失]の少ない[低・高]い周波数が用いられる。

解答と解説

- ① [4] ② [伝搬損失] [低]

人工衛星は、太陽電池で稼働するため使用できる電力に制限があり、帯域幅や減衰度などを考慮して最も適切な周波数帯を使用することになっています。通信衛星、放送衛星、軍事衛星など様々な人工衛星があり、目的や打ち上げた国によって異なる周波数帯や変調方式が用いられていますが、出題例では6GHzと4GHz帯が対で使用されています。

例題

次の記述は、静止衛星通信の特徴について述べたものである。このうち誤っているものはどれか。

- ① サービスエリアが広域で、衛星を中継することにより多地点間で広範囲の通信を設定できる。
- ② 静止衛星は、赤道上空約36000kmの軌道にある。
- ③ 通信衛星の電源には太陽電池を使用するため、太陽電池が発電しない衛星食の時期に備えて、蓄電池などを搭載する必要がある。
- ④ 往路および復路の両方の通信経路が静止衛星を経由する電話回線においては、送話者が送話を行ってからそれに対する受話者からの応答を受け取るまでに約0.25秒の遅延があるため、通話の不自然性が生じることがある。

解答と解説

④

静止衛星中継時の遅延は、1往復で0.25秒であるため、往復ともに通信衛星を経由する場合は、合計0.5秒程度の遅延が生じます。

4

多重通信の基礎

衛星通信やマイクロ波通信などでは、一つの電波に同時にたくさんの通信内容を乗せることが行われます。これを多重通信といい、現代のような高度情報化社会にとって欠かせない技術です。多重通信にはいくつかの種類があるので、それぞれの方式の特徴について知っておかなければなりません。

1 TDMA(Time Division Multiple Access)方式

同一周波数を時間で区切り、複数の通信を時間的に細切れにして伝える方式です。例えば、ある人がしゃべっている声を聞くと、短い時間であれば耳をふさいでも相手が何を話しているか理解できますよね。このように、伝えるべき情報によっては、それを細切れにしてもちゃんと伝わることを利用し、複数の通信を細切れにして時間差を付けて送ることで複数の情報を伝える方式です。複数の情報が時間的に隙間なくつながってしまうと、どこが区切りなのかが分からなくなってしまうため、複数の情報間にはガードタイムという空き時間を設けます。なお、FMラジオのステレオ放送はこの方式を利用し、右と左の2つの情報を一つの電波に乗せて送っています。

2 FDMA(Frequency Division Multiple Access)方式

複数の情報を、異なる周波数帯域に乗せて送る方式です。例えば、声が低い男性と高い女性が同じ場所で同時にしゃべっていても、聞く側は二人が何をしゃべっているのか理解できますよね。情報はある周波数の幅を持っていて、その周波数は数学的に足し算や引き算ができます(マイクを通すと、声が高くなったり低くなったりする玩具は、これを利用しています)。これを利用し、伝えるべき複数の情報を、たがいに重ならない周波数に変換して一つの電波に乗せるのがこの方式です。複数の情報が隙間なくつながってしまうと、どこが区切りなのかが分からなくなってしまうため、ガードバンドという空き周波数を挟むことで複数の情報間の区切りを明確にします。

3 CDMA(Code Division Multiple Access)方式

複数の情報を、それぞれ別の符号に変換して同一の電波に乗せて送る方式です。例えていうと、複数の人が同時にしゃべっている情報を、ひとつは日本語、ひとつは英語、ひとつはロシア語…に通訳して、これらを同時に送ります。受信した側で、日本語が分かる人は日本語の、英語が分かる人は英語の、ロシア語が分かる人はロシア語…の情報を取得することができます。これがCDMAの原理です。

4 SCPC(Single Channel Per Carrier)方式

基本的にはFDMAと同じ方式で、デジタル通信用に用いられるものです。たがいに重ならない伝達周波数のことをキャリア(搬送波ともいいます)といい、1つのデジタル音声信号について1つのキャリア周波数を割り当てるものです。

例題

次の記述は、衛星通信の接続方式等について述べたものである。このうち誤っているものを選べ。

- ① TDMA方式では、隣接する通話路間の干渉を避けるため、各地球局の周波数帯域が互いに重なり合わないよう、ガードバンドを設けている。
- ② SCPC方式では、一つのチャンネルを一つの搬送周波数に割り当てている。
- ③ TDMA方式は、各地球局に対して使用する時間を割り当てる方式である。
- ④ FDMA方式は、各地球局に対して使用する周波数帯域を割り当てる方式である。
- ⑤ デマンドアサインメントは、通信の呼が発生する度に衛星回線を設定する。

解答と解説

①

この内容は、FDMA方式の説明です。②～⑤の記述はその通りです。

例題

衛星通信の時分割多元接続(TDMA)の一方式について述べたものとして、正しいものはどれか。

- ① 多数の局が同一の搬送周波数で一つの中継装置を用い、時間軸上で各局が送信すべき時間を分割して使用する方式である。
- ② 隣接する通信路間の干渉を避けるため、ガードバンドを設けて多重通信を行う方式である。
- ③ 中継局において、受信波をいったん復調してパルスを整形し、同期を取り直して再び変調して送信する方式である。
- ④ 呼があったときに周波数が割り当てられ、一つのチャンネルごとに一つの周波数を使用して多重通信を行う方式である。

解答と解説

①

- ② TDMAでは時間的に分割して複数の通信を行うため、干渉しないように設ける空き時間をガードタイムと呼びます。
- ③ 再生中継方式の説明です。
- ④ これは、デマンドアサインメント方式の説明です。

5

OFDMA方式 の概要

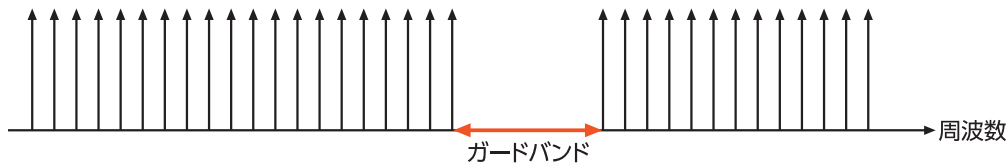
OFDMA方式は、日本語で直交周波数分割多元接続方式といいます。これは音声通話よりも、インターネットのようなデジタルデータ通信に適した方式です。SCPC方式の説明で搬送波という言葉を出しました。これは搬送のための波という文字どおり、ある信号を電波に乗せて送るとき、そのベースとなる高周波信号のことを指します。たとえば、我が国のAMラジオ放送は9kHzおきに周波数が並んでいますが、この周波数は搬送波の周波数を指しています。NHK東京第1放送は594kHzの電波ですが、この電波に0.5~4kHzの幅がある信号を情報として乗せると、実際の放送電波は590~593.5kHzと594.5~598kHzの間に拡散されたものとなります。AM方式はこのように、(搬送波の周波数)±(信号周波数)の成分を含んだものとなります。

【AMラジオ放送の周波数は9の倍数】

我が国のAMラジオは、531~1602kHzの周波数を9kHzおきに使用しています。9の倍数は、数字を全部足すと9の倍数になるという特徴がありますから、ためしに計算するとNHK東京第1は $5+9+4=18$ 、NHK東京第2は $6+9+3=18$ 、TBSラジオは $9+5+4=18$ 、CBCラジオは $1+0+5+3=9$ と、確かにその通りになります。AM方式で信号を送る場合、(搬送波の周波数)±(信号周波数)の成分を含みますから、隣の周波数のラジオ局と混信しないようにするためには、最高でも4.5kHzの信号周波数までしか送ることができません。これが、AMラジオは音が良くないとされる理由です。

電話の音声信号を伝達する場合などは、常にリアルタイムで一定の周波数幅を確保しなければ通話が成り立ちません。しかし、インターネットなどのデジタルデータ伝送の場合、データが流れていない時間と大量のデータが一気に流れる時間の差が極端です。この場合、データが流れていない間も一定の周波数幅を確保しては、電波資源が非常に無駄になってしまいます。

そこで、ある一定の周波数幅を細かい搬送波周波数に分割し、細かく区切った時間ごとに細分化したデータを割り振って伝送するのがOFDMA方式です。



例えば、無線で伝送する5MHzの周波数幅を5kHzごとに区切り、1000個の搬送波に分割します。また、時間を1msごとに分割すれば、1秒あたり $5\text{kHz} \times 1\text{ms}$ のデータ転送枠が1000個ずつ生まれることになります。この枠を、必要に応じて複数の通信に順次割り当てることにより、周波数幅を効率よく利用し、かつ複数のデータ通信が同時に行えるようにしているのです。

ただし、実際には $5\text{kHz} \times 1\text{ms}$ ごとにきれいに分割して隣のデータと全く干渉を起ささないようにすることは難しいため、連続した10個や20個などの搬送波群をひとまとめにしたグループ単位で通信に割り当てることにより、現実的に発生する電波干渉や相互変調(回路内部で発生する信号歪みにより、信号同士が干渉して波形が崩れてしまう現象)の影響を緩和しています。

例題

次の記述は、直交周波数分割多元接続 (OFDMA) について述べたものである。このうち誤っているものを下の番号から選べ。

- ① WiMAX (直交周波数分割多元接続方式広帯域移動無線アクセスシステム) で利用されている。
- ② サブキャリアを複数のユーザーが共有し、割り当てて使用することにより、効率的な通信を実現することができる。
- ③ ある程度、周波数を離れたサブキャリアをセットとして用いることによって、送信側の増幅器でサブキャリア間の相互変調を起し難くできる。
- ④ FDD (周波数分割複信) に適用することができるが、TDD (時分割複信) には適用することができない。

解答と解説

④

サブキャリアというのは、ある周波数帯域幅を細かく分割した搬送波のことです。OFDMAの原理は、周波数分割と時分割を組み合わせた方式ですから、④の記述は誤りです。

例題

OFDM(直交周波数分割多重)において、キャリア間隔(基本周波数)が20kHzのときの有効シンボル期間長(変調シンボル長)はいくらか。

解答と解説

50 μ S

周波数は「1秒間に信号が何回繰り返すか」の値ですから、繰り返しの時間間隔と周波数は反比例の関係にあります。したがって $1 \div 20\text{kHz} = 50\mu\text{S}$ と求めることができます。

OFDM方式 の詳細

OFDMA方式の基盤技術であるOFDM方式について、さらに詳しく説明します。

多重通信の開発技術者は、いかにして狭い周波数帯域で複数・大量のデータを効率よく伝送するか、電波の干渉による歪み(位相歪み、振幅歪み)や雑音などの影響を受けにくいようにするかなどに心血を注いできました。

電波はビルや地面などで反射する性質があるので、ある特定の周波数において複数の経路の電波が合成されて大きく歪み、信号伝送に使えないことがあります。例えば5MHzの幅を必要とする信号をそのまま一括で送るとすると、5MHzのうちほんの一部の周波数でも歪みが発生すれば全体がエラーとなり、通信不可能となってしまいます。搬送波に信号を乗せるとき、伝送する信号の量(速度)と必要な周波数幅は基本的に比例しますから、伝送量を増やせば増やすほどエラーの可能性が増え、通信が難しくなってしまいます。

しかし、OFDMを用いて周波数・時間ともに分割して送信データを細切れに乗せれば、たとえ一部の周波数幅でエラーが生じて、残りの部分でデータを届けることができ、エラーになった部分は別の周波数部分を用いて再伝送すればよいのです。これが、DFDMが電波経路による信号歪み(マルチパスといいます)に強い原因です。

キャリアにデータを乗せることを変調といいます。音声などのアナログ信号は連続した周波数の幅を持ちますが、デジタルデータは1か0かの2値を取りますから、変調した結果の信号も離散的な値を取ります。ここで1回のデジタル変調を特にシンボルと称し、変調速度のことをシンボルレートといいます。信号の変化速度は時間の単位で、時間と周波数の関係は逆数ですから、信号が短い時間で変移する＝変調速度(シンボルレート)が大きいほど、その信号は高い周波数成分を持つことになり、変調後の電波が持つ帯域幅も広がります。

【変調速度が速いほどエラー発生は多くなる】

たまに、ものすごく早口な人っていますよね。逆に、マイペースでのんびりした人もいます。話を聞くとき、どちらが聞き取りやすいでしょうか？

これは間違いなく、ゆっくり喋った方が聞き取りやすいですね。実はこれも、速度が速いほど、聞いている側のエラー訂正余力が無くなっていくために生じているのです。また、早口を聞いて理解しようとする、と、すごく頭を使って疲れますよね。これは機械も同じで、データ伝送速度を上げれば上げるほど回路の消費電力も増大します。意外なところで人間も機械も同じなのですね。

例題

次の記述は、直交周波数分割多重(OFDM)伝送方式について述べたものである。このうち誤っているものを選び。

- ① OFDM伝送方式を用いると、一般に単一キャリアのみを用いた伝送方式に比べマルチパスによる遅延波の影響を受けにくい。
- ② 各キャリアを分割してユーザーが利用でき、必要なチャンネル相当分を周波数軸上に多重化できる。
- ③ 各キャリアの周波数間隔 Δf は、有効シンボル期間長(変調シンボル長)の逆数と等しくなっている。
- ④ 高速のビット列を多数のキャリアを用いて周波数軸上で分割して伝送することで、キャリア1本当たりのシンボルレートを高くできる。
- ⑤ ガードインターバルは、遅延波によって生ずる符号間干渉を軽減するために付加される。

解答と解説

④

キャリア1本当たりのシンボルレートは、高いほうが伝送速度は高速になる反面、マルチパスによる遅延波との干渉で信号歪みが生じた場合などのエラーに弱くなってしまいます。そこでOFDM方式では、一定の周波数帯域を多数のサブキャリアに分割することでサブキャリア1本当たりのシンボルレートを低くし、信号歪み発生時のリカバリーを容易にしています。

7

CDMA方式 の概要

CDMAは、符号分割多元接続の略で、複数の信号をそれぞれ固有の符号(PN符号といいます)により、わざと広い帯域の周波数に変換します(スペクトラム拡散といいます)。以前、たとえ話で、複数のデータをそれぞれ日本語、英語、ロシア語…に変換して重ねて送り、受信側で個別に再変換すると説明しましたが、このいろいろな言語がPN符号に該当するわけです。

さて、多重通信の歴史は、大量のデータをできるだけ狭い周波数帯域で伝送する技術の開発だと話しましたが、わざわざ広帯域にデータを拡散させるCDMAは一見逆のことを行っているように見えます。しかし、OFDM方式が、一定の周波数帯域をわざと細分化してデータを送っていた理由を思い出してください。実際の通信上、マルチパスなどにより特定の周波数において歪みが生じ、データが伝送しにくい場合が生じることがありますが、このとき、伝送するデータを幅広い周波数に拡散しておけば、特定の周波数で伝送エラーが発生しても、相対的な影響は小さくて済むことになります。また、多少周波数帯域が拡散したとしても、それ以上に多数のデータを多重化できるメリットがあるため、携帯電話やGPSなどに利用されています。

もう少し詳しく説明すると、CDMAはPN符号を使って送信信号を拡散し、受信側で同じPN符号で元に戻す、という処理をしているため、信号のS/N比を高く取れるという大きな特徴があります。これを相関処理といい、目的の信号以外は単なる雑音となって平均化されてしまうという性質があるのです。これはちょうど、どこか海外の国に行って、知らない言葉をしゃべる人がたくさんいる中でも、日本語が聞こえたら自然に日本語が頭に入ってくるのと同じことなのです。

CDMAの特徴は、利点ばかりではありません。CDMAの主な問題として、遠近問題があります。これは、基地局から見て、近い送信者の電波が強く、遠い送信者の電波が弱くなってしまったために生じるものです。

強い電波と弱い電波の強度差が大きすぎると、受信回路が増幅できる信号強度の幅(ダイナミックレンジといいます)を超えてしまい、強い信号によって弱い信号が消えてしまって通信ができなくなります。これを緩和するために、CDMAとは別に送信電力を制御する仕組みを設け、各端末が基地局とやり取りする送信電力を必要最小限に抑えることで基地局側の回路のダイナミックレンジを超えないようにする必要があります。

例題

次の記述は、直接スペクトラム拡散方式を用いた符号分割多元接続(CDMA)について述べたものである。このうち誤っているものを選べ。

- ① 拡散後の信号(チャネル)の周波数帯域幅は、拡散前の信号の周波数帯域幅よりはるかに狭い。
- ② 疑似雑音(PN)コードは、拡散符号として用いられる。
- ③ 傍受されにくく秘話性が高い。
- ④ 遠近問題の解決策として、送信電力制御という方法がある。
- ⑤ 送信時に拡散された信号は、受信時に逆拡散されて復調される。

解答と解説

①

拡散後の周波数帯域幅は、信号周波数の帯域幅よりはるかに広がります。
また、拡散に使うPN符号を拡散後の信号から求めることは容易ではないため、PN符号を秘匿することにより、容易に解読できない暗号化通信とすることができます。

例題

次の記述は、符号分割多元接続(CDMA)について述べたものである。このうち誤っているものを選び。

- ① 各信号(チャンネル)は、ベースバンドの信号よりも広い周波数帯域幅が必要である。
- ② 疑似雑音(PN)コードは、拡散符号として用いられる。
- ③ 同一周波数帯域幅内に複数の信号(チャンネル)は混在できない。
- ④ 傍受されにくく秘話性が高い。
- ⑤ 送信時に拡散された信号は、受信時に逆拡散されて復調される。

解答と解説

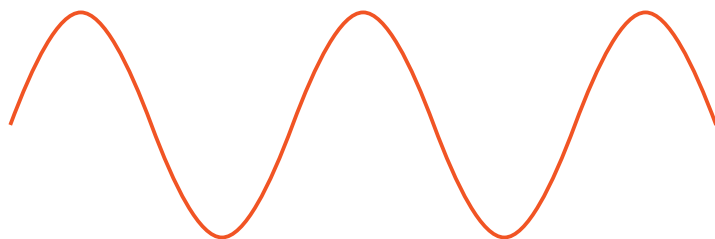
③

同一周波数帯域幅内に、それぞれ別のPN符号で拡散した複数の信号を多重化するのがCDMAの特徴です。なお、ベースバンド信号というのは、伝えたいデジタル信号データそのものを指します。

8 変調方式の基本

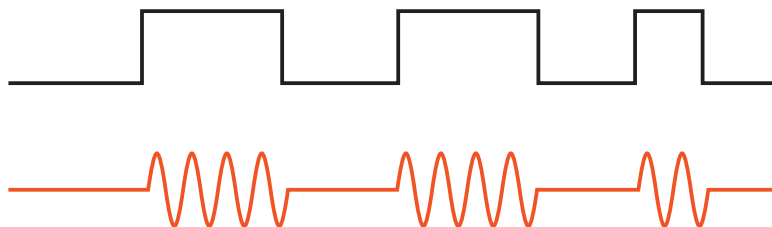
これまで、伝送したいアナログやデジタルの信号を、どのように電波に乗せるのかという考え方について解説してきました。いっぽう、実際に電波を変調するためには、必ず電子回路によるハードウェア処理が必要となります。ここからは、高い周波数の交流信号である電波の波形に、どのようにして情報を乗せるかというハードウェアに近い部分を説明していきます。

電波といっても、要するに単なる交流の電気に他なりません。この交流の電気が空間中を伝わっていく現象が電波です。



この交流波形を変形させて情報を乗せるわけですが、変形させられる要素は以下のようなものがあります。

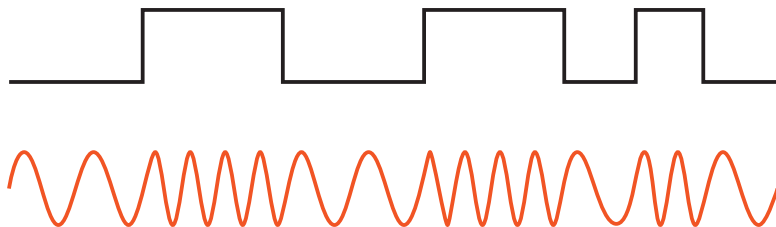
1 振幅変調 (AM)



振幅に情報を乗せる(振幅変調)というのは、例えばデジタル信号の0では振幅をゼロ、1では振幅を1Vにする、という方式です。さらに、例えばデジタル信号の00で振幅をゼロ、01で0.3V、10で0.6V、11で0.9Vと割り振ることにより、振幅方向に一度に寄せられる情報を増やすことができます。この方式の欠点は、雷などの外来雑音に弱いという点です。雑音は振幅情報として乗りますので、雑音が発生すると途端にエラーが増えてしまいます。

デジタル信号で振幅変調を行うことを、ASK (Amplitude Shift Keying) と呼びます。

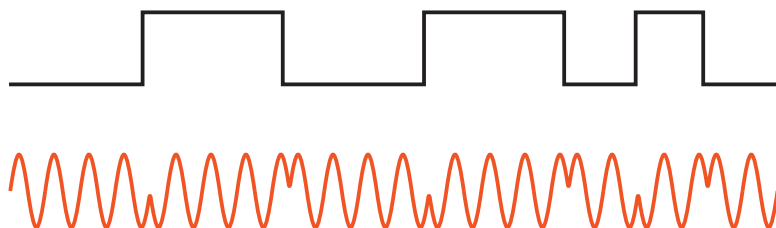
2 周波数変調 (FM)



周波数変調というのは、デジタル信号の00で100MHz、01で101MHz、10で102MHz、11で103MHzというように、送信するデータの値によって搬送波の周波数を変える方法です。この方式は外来雑音に強い性質を持つため、FMラジオの放送は雑音が入りにくいのを体感したことがある人も多いでしょう。周波数の刻み幅を細かくすれば一度の変調で多ビットの情報を乗せられますし、良いことづくめのように思えますが、原理上占有周波数帯域が大きく広がってしまうという欠点があります。(計算にはベッセル関数が必要で、一陸技の範囲になります)

デジタル信号で周波数変調を行うことを、FSK (Frequency Shift Keying) と呼びます。

3 位相変調 (PM)



位相変調というのは、送る情報によって搬送波の位相を変化させる方式です。

位相変調も、例えば00で位相差ゼロ、01で位相差90°、10で位相差180°、11で位相差270°といったように、一度の変調で多数のビットを送ることができます。また、周波数変調ほど帯域が広がらず、振幅変調との組み合わせが可能であることから、デジタルデータ伝送用の変調方式として広く用いられています。

位相変調はPSK (Phase Shift Keying) といいますが、PSKには、180度の位相差で1シンボルに1ビットを乗せるBPSK、90度の位相差で1シンボルに2ビット(4値)を乗せるQPSKなどがあります。

例題

次の記述は、PSKについて述べたものである。このうち誤っているものを選び。

- ① 2相PSK(BPSK)では、“0”、“1”の2値符号に対して搬送波の位相に π の位相差がある。
- ② 8相PSKでは、2相PSK(BPSK)に比べ、1シンボルで8倍の情報量を伝送できる。
- ③ 4相PSK(QPSK)は、搬送波の位相が互いに $\pi/2$ 異なる2つの2相PSK(BPSK)変調器を並列に用いて実現できる。
- ④ $\pi/4$ シフト4相PSK($\pi/4$ シフトQPSK)では、隣り合うシンボル間に移行するときの信号空間軌跡が原点を通らないため、包絡線の急激な変動を防ぐことができる。
- ⑤ 4相PSK(QPSK)は、1シンボルの1つの信号点が表す情報は、“00”、“01”、“10”、“11”のいずれかとなる。

解答と解説

②

QPSKは、4つの位相点を取る変調方式です。通常、その4点を、デジタル信号の2ビット値である00、01、10、11に対応させて伝送します。

$\pi/4$ シフト4相PSKは、位相偏移時に零点を通らないため、変調波の振幅の急激な変動を防ぐことができ、増幅器の直線性に起因する歪みなどを低減できる性質を持っています。

BPSKは、2値符号に対して搬送波に π の位相差を付けるもので、1回の変調で1ビットを伝送します。8PSKは1回の変調で3ビットを伝送します。

9

QAM変調方式

前章では、電波に情報を乗せる(変調する)基本的な方法として、振幅・周波数・位相の3つがあることを解説しました。しかし、モバイルインターネットの普及に伴い、やり取りされる情報量も飛躍的に増加した結果、無線通信においてもさらなる伝送速度の増大が求められました。

そこで、振幅変調と位相変調を組み合わせることでより伝送容量の増大を図ったのがQAM(直角位相振幅変調)方式です。例えば、振幅の大小と位相差 $0\cdot\pi$ を組み合わせると、以下のように4通りの情報を乗せることができます。

振幅大・位相差 $0\cdots$ ”00”

振幅小・位相差 $0\cdots$ ”01”

振幅大・位相差 $\pi\cdots$ ”10”

振幅小・位相差 $\pi\cdots$ ”11”

QAM波を作るためには、振幅変調器と位相変調器を直列に接続すれば作れるように思いますが、工夫すれば原理的に2つの振幅変調器で作れるため、その方法が用いられます。

まず、位相が $\pi/2$ (90度)異なる2つの搬送波を用意し、それぞれを4値や8値、16値などの刻み幅で振幅変調します。この2つの搬送波を合成すると、振幅と位相に情報が乗ったQAM波を得ることができます。

位相が90度異なる搬送波(正弦波)のことを、直交する正弦波といいます。これは位相が90度直交しているという意味なのですが、これらを合成して1つの波形にしても、受信側で2つに綺麗に分離できるという性質があるのです。詳しくは三角関数の理論が必要となりますが、このようにして効率よく多くの情報を乗せることに成功しました。なお、2つの振幅変調器で $4\times 4=16$ 値の変調を行うものを16QAM、 $8\times 8=64$ 値の変調を行うものを64QAMと称します。

さて、16QAMは一度に16ビット、QPSKは一度に4ビットが伝送できる方式ですが、実はその帯域を完全に使うことはできません。何故なら、実際の電波は雑音や歪みなどにより、データエラーが生じるからです。そこで、例えば2ビットの伝送のためにエラー訂正ビットを追加し、合計3ビットで実質2ビットを伝送するようなことが行われます。この割合を符号化率といいます。

例題

次の記述は、デジタル変調のうち直交振幅変調(QAM)方式について述べたものである。このうち誤っているものを選べ。

- ① 搬送波の振幅と位相の2つのパラメータを用いて、より多くの情報を効率良く伝送する方式である。
- ② 64QAMは、64個の信号点を持つQAM方式である。
- ③ 64QAM方式とQPSK(4PSK)方式を比較すると、64QAM方式は、同程度の占有周波数帯幅で同一時間内に3倍の情報量を伝送できる。
- ④ 64QAM方式とQPSK(4PSK)方式を比較すると、64QAM方式は、フェージング等の振幅の変動に対して符号誤り率が小さくなる。

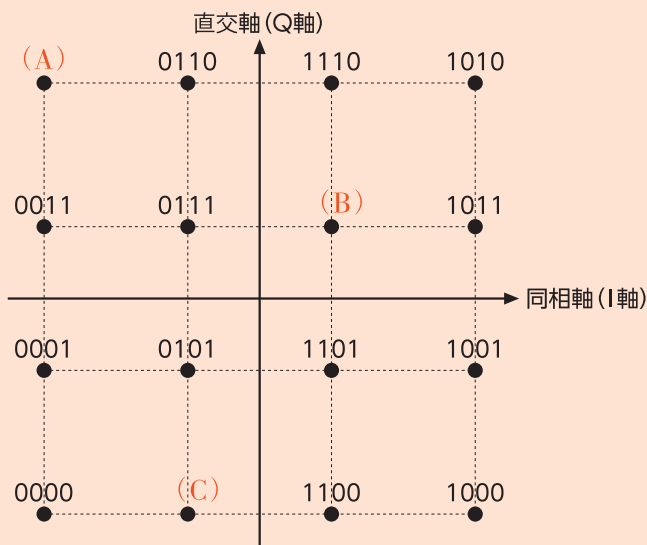
解答と解説

④

64QAMは、1シンボルで6ビット(64値)の情報を送れるのに対し、QPSKは1シンボルで2ビット(4値)の情報を送れます。ただし、振幅に細かく情報を乗せているQAMは、フェージング(電波の到達経路などの理由により、受信側の電波強度が強くなったり弱くなったりする現象)などで振幅が変動した場合、符号誤り(エラー)率が大きくなる欠点があります。

例題

図は、グレイ符号による16QAMの信号空間ダイアグラム(信号配置図)の一例である。カッコ内に入れるべき2進符号を答えよ。



解答と解説

A:0010 B:1111 C:0100

I軸とQ軸は、2つの直交する搬送波を表しています。それぞれ4値で振幅変調し、その結果を合成することで図のような4×4のマトリクスが成立します。

この16点に2進数の0000～1111を割り振って伝送するのですが、送信側と受信側の解釈が合致してさえいれば、どの値をどの点に割り振っても自由です。しかし、それでは節操なくなってしまうので、となり合う符号間の差が小さくなるという規律に合わせて符号を当てはめるのが一般的です。

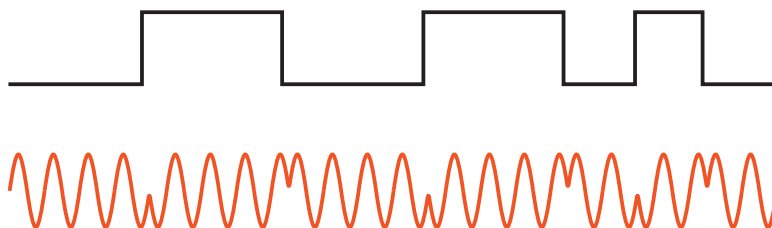
さて、一番左の列を縦に見ると、いずれも最初は00で始まります。左から2列目は01、3列目は11、4列目は10で始まっています。従ってAは00、Bは11、Cは01で始まることが予見できます。

次に行を見ていくと、一番上の行はいずれも10で終わり、2行目は11、3行目は01、4行目は00で終わっていることが分かります。

以上のことを組み合わせると、Aは0010、Bは1111、Cは0100であることが求められます。

PSK変調・ 復調方式

PSKは、変調方式の基本で説明したとおり、搬送波の位相を変化させることで電波に情報を乗せる方式です。

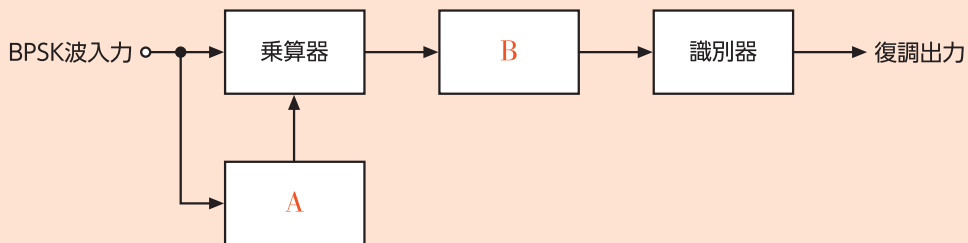


ある周波数成分を含んだ交流信号は、乗算器を用いて信号周波数どうしの足し算や引き算を行うことができます。例えば、954kHzの搬送波に1kHzの信号を乗算すると、953kHzと955kHzの混合波が得られます。また、その変調波に再度954kHzの交流信号を乗算すると、差の周波数信号、すなわち0Hzを中心として電波に乗せて送られてきた1kHzを取り出すことができます。乗算器の出力にLPF(ローパスフィルター、低い周波数だけを取り出す回路)を設けることにより、受信信号と、乗算器に入力した信号の差成分を取り出すことができます。(通常のAMラジオはもっと簡便な回路で音声信号を取り出していますが、通信用の高級ラジオの中には、この原理を用いて音声信号を取り出している機器もあります。)

この方式を同期検波といい、PSK信号の復調に利用されています。

例題

図は、同期検波によるBPSK波の復調器の原理的構成例である。図中のA・Bに当てはまる正しい字句を答えよ。



解答と解説

A: 搬送波再生回路

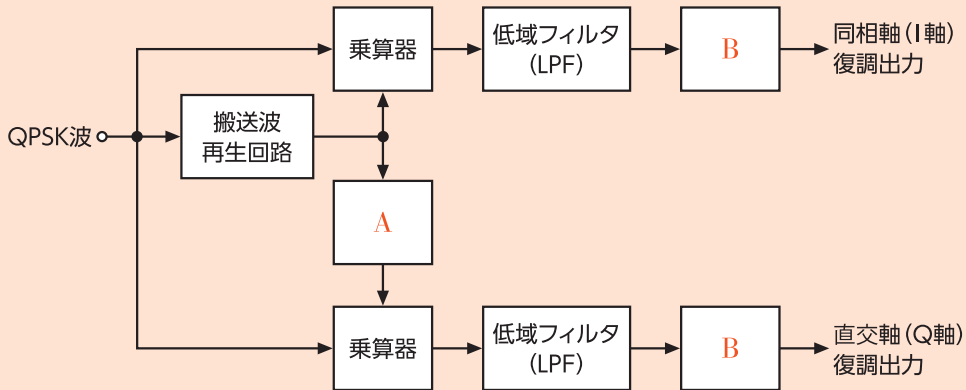
B: 低域フィルタ(ローパスフィルター、LPF)

PSK波を同期検波するには、受信信号から純粋な搬送波を取り出し、その信号と乗算することで周波数の差を取り出す必要があります。そのため、Aは搬送波再生回路、BはLPFが適切なものとなります。

識別器は、受信されたアナログ信号を整形・処理し、デジタル信号として出力するための回路です。

例題

図は、同期検波によるQPSK(4PSK)復調器の原理的構成例を示したものである。図中のA・Bに当てはまる正しい字句を答えよ。



解答と解説

A: $\pi/2$ 移相器

B: 識別器

2相PSK(BPSK)は、デジタル信号の0と1で搬送波を180度位相反転させることで信号を伝えますが、4相PSKは、デジタル信号の00、01、10、11を90°ずつの位相差に対応させて信号を伝えます。このとき、0°と180°はBPSKと同じ原理で復調できますが、90°と270°の復調はそのままではできません。そこで入力信号を2つに分け、搬送波再生回路で再現した搬送波と直接乗算する回路と、搬送波を90°移相させることで90°と270°の復調を行う回路の2系統を用いて4相の信号を識別します。このような回路のIQディテクターと呼び、それぞれ同相の0°と180°を出力するI出力、直交する90°と270°を出力するQ出力を持っています。

11

MIMO

MIMOとは、Multiple Input and Multiple Outputの略でマイモと呼ばれます。これは、送信側と受信側で互いに複数のアンテナを用い、通信品質を安定・向上させる技術のことを指しています。なお、送信側・受信側ともにアンテナ1本であるものをSISO、送信側が1本、受信側が複数のものをSIMO、送信側が複数で受信側が1本のをMISOと略します。

身近にあるAMラジオなどでは、複数のアンテナを用いなくても何ら問題なく受信できるのに、デジタル通信では何故このような技術が必要なのでしょう。分かりやすい例は、移動しながらFMラジオやTV放送を受信する場合です。ある位置ではきれいに受信出来ていても、ビルの合間などで少し動いただけで急に受信状態が悪くなってしまう経験がある人も多いのではないのでしょうか。そのような場合、さらにもう少し動けば受信状態は回復したりするものです。

このような現象はなぜ生じるかという、送信アンテナから受信アンテナまでに複数の電波伝搬経路がある場合、伝搬経路の微妙な距離差などにより、電波が干渉して強めあったり弱めあったりするのです。これを干渉性フェージングといい、信号の周波数が高くなればなるほど顕著になることが知られています。原理的にはAMラジオの電波でも起こるのですが、AMラジオは周波数が低い(波長が長い)ため、ほとんど体感することができないだけなのです。

複数の伝搬経路が存在することで信号に干渉を起こすマルチパスは、従来嫌われてきたものでした。自動車の後部左右にアンテナを設け、どちらか信号強度の高い方を拾うことでFMラジオなどの受信状況を安定させるダイバーシティ受信はその解決策の一つです。実は携帯電話の内部も、若干の間隔を置いて複数のアンテナを配置し、マルチパスによる悪影響を緩和している機種がほとんどです。

しかし、このマルチパスを排除できないのであれば、むしろ積極的に活用しようという考え方が生まれました。これがMIMOで、空間中に送信側複数・受信側複数の伝送路が形成されていると見なします。高速で複雑な信号処理技術が必要となりますが、近年の信号処理技術の進展により、実用的な処理を行うことが可能となりました。これにより、周波数帯域を増大させることなく信号を高速伝送できるようになり、周波数の利用効率を向上させることができます。

例題

次の記述は、MIMO (Multiple Input Multiple Output) の特徴などについて述べたものである。カッコ内に当てはまる字句をそれぞれ選べ。

- ① MIMOでは、送信側と受信側の双方に複数のアンテナを設置し、マルチパス伝搬環境を積極的に利用することにより送受信アンテナ間に複数の伝送路を形成して、伝送容量の増大の実現あるいは伝送品質の向上を図ることができる。例えば、基地局から端末への通信(下りリンク)において、複数の基地局送信アンテナから異なるデータ信号を送信しつつ、複数の端末受信アンテナで信号を受信し、信号処理技術により送信アンテナ毎のデータ信号に分離を行うことにより、新たに周波数帯域を増やさずに高速伝送できるため、周波数の利用効率に[劣って・優れて]いる。
- ② MIMOは、LTE (Long Term Evolution) や [WiMAX・VSAT] などで用いられている。

解答と解説

- ① [優れて] ② [WiMAX]

MIMOの技術を用いると、同一の周波数帯域内で複数の伝送路を設定できるため、周波数帯域を増大させることなく伝送の高速化などを行うことができます。したがって周波数の利用効率に優れた方式といえます。

MIMOは、新たな携帯電話の通信規格であるLTEのほか、人口希薄地帯や高速通信回線の敷設・利用が困難な地域における接続技術の一つであるWiMAXなどで利用されている技術です。