2015年度前期
無線通信システム

第2回　無線アクセスの回線設計

阪口 啓 <sakaguchi@mobile.ee.>

2015年4月22日

講義スケジュール（前半）

	日付	教科書	内容
第1回	4月15日	1、7	無線通信システムの概要 ～IEEE802.11WLANを例に～
第2回	4月22日	2、5、他	無線アクセスの回線設計
第3回	4月30日		変復調と等価低域表現
第4回	5月13日	3.3、3.4	ディジタル変調と波形整形
第5回	5月20日		MATLAB演習
第6回	5月27日	3.5	復調方式と誤り率特性
第7回	6月　3日	4.4	フェージングとダイバーシチ
第8回	6月10日		理解度確認

前回の復習

- 無線通信システムの概要
  BAN, PAN, LAN, MAN, ITU, PHY, MAC
- 無線通信システム設計の概略
  周波数，帯域幅，電力，アンテナ，通信方式
- システム劣化要因と対策技術の概略
  フェージング，符号間干渉，他局間干渉
- IEEE802.11a無線LAN
  OFDMと適応符号化変調を用いたW-LAN

講義内容

- 通信路容量
- 帯域幅と中心周波数
- 信号対雑音電力
- アンテナとカバレッジ
- 多重アクセス
- 無線アクセスの設計例

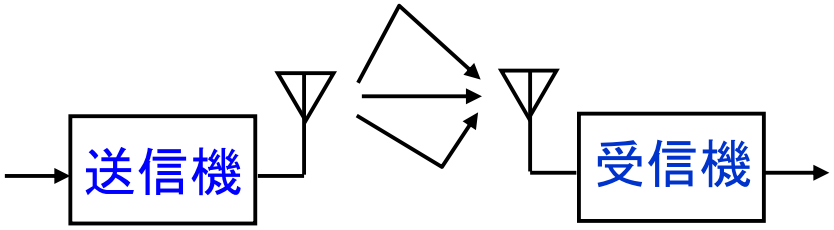
無線通信システムの設計

ある無線通信システムを設計したい！

周波数？ f_0

アンテナ？ G_{t}

帯域幅？ B



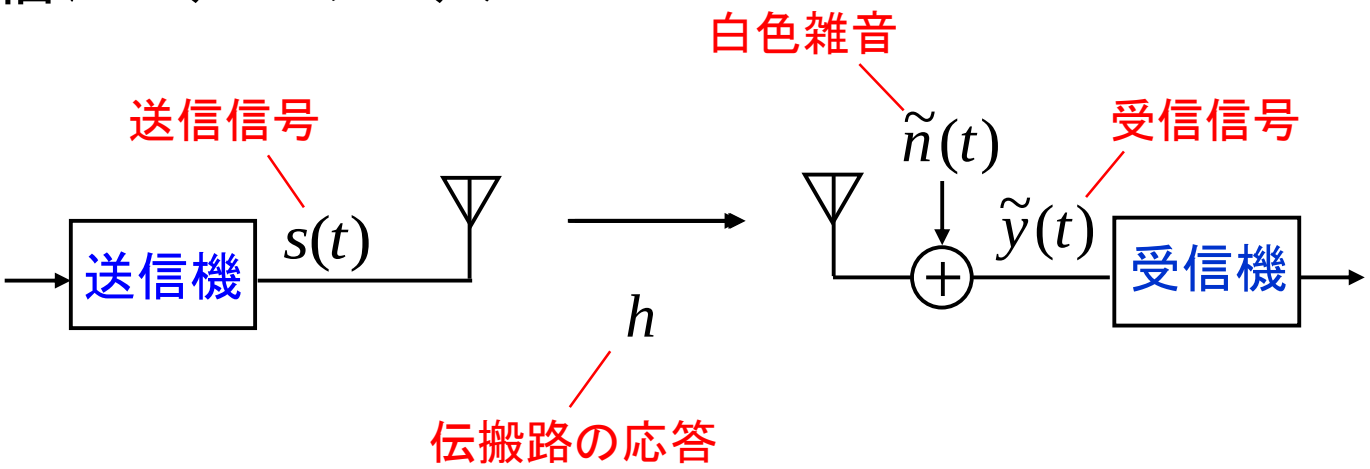
通信方式？ R

送信電力？ P_{t}

アクセス方式？ N_{UE}

通信システムのモデル

■ 通信システムのモデル



■ 受信信号モデル

$$\tilde{y}(t) = hs(t) + \tilde{n}(t)$$

送信電力

$$P_{\mathrm{t}} = \mathrm{E}\left[\left|s(t)\right|^2\right]$$

伝搬路の利得

$$g = h^2$$

雑音電力

$$P_{\mathrm{n}} = \mathrm{E}\left[\left|\tilde{n}(t)\right|^2\right]$$

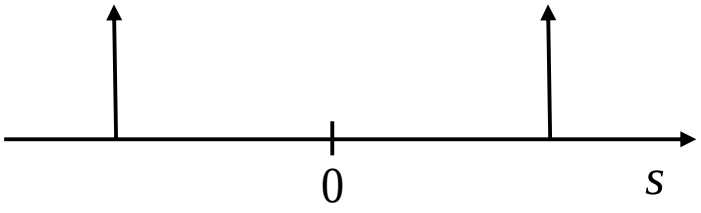
情報量とエントロピー

■ 情報量

$P(s)$ ：確率分布

$$I(s) = \log_2 \frac{1}{P(s)} = -\log_2 P(s)$$

バイナリ分布

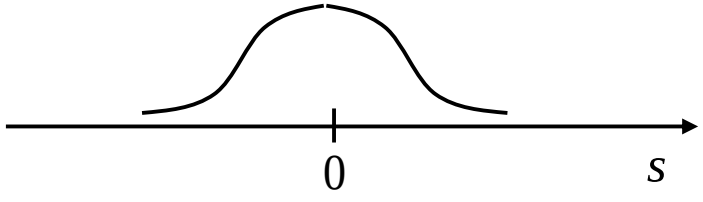


■ エントロピー

$$H(s) = \mathrm{E}[I(s)] = \int P(s) I(s) \mathrm{d}\, s$$

$$= -\int P(s) \log_2 P(s) \mathrm{d}\, s$$

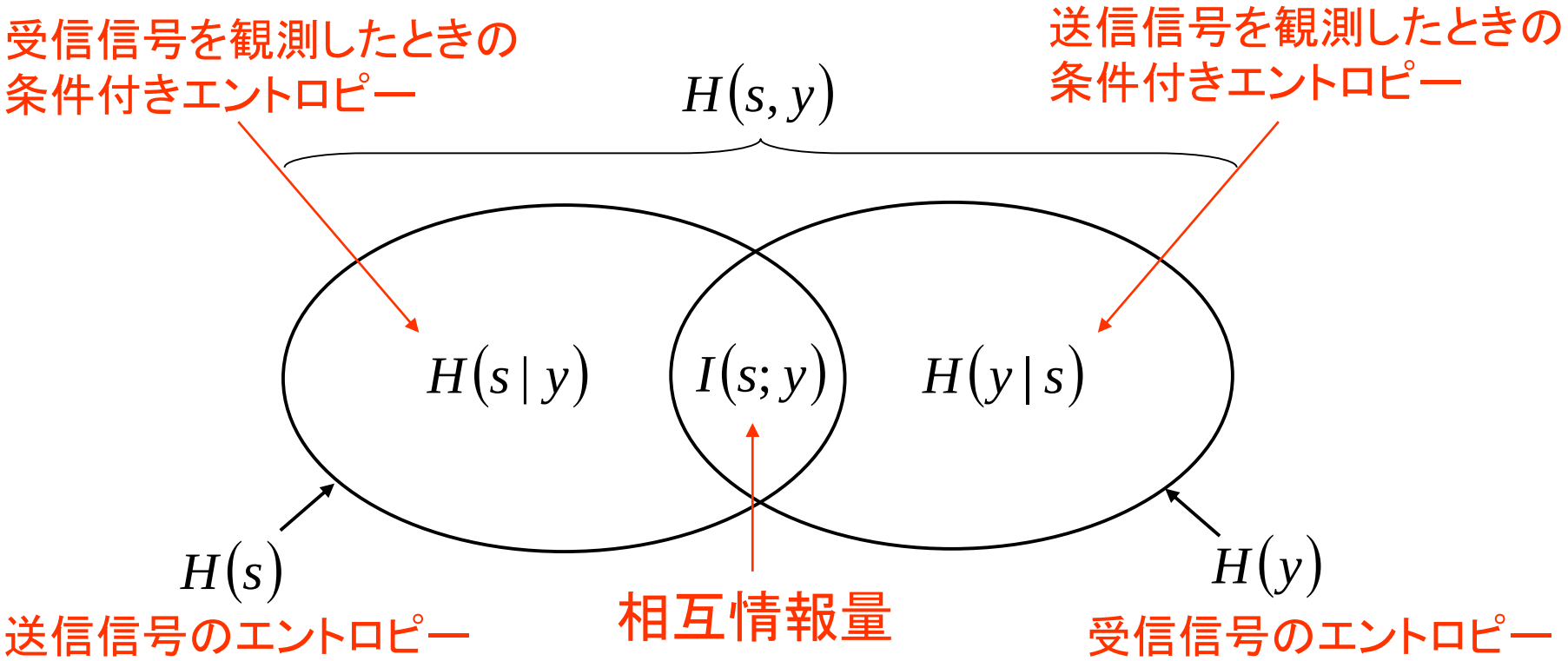
ガウス分布



相互情報量

$$y(t)=\frac{\tilde{y}(t)}{h}=s(t)+\frac{\tilde{n}(t)}{h}=s(t)+n(t)$$

$$I(s;y)=H(y)-H(y\,|\,s)$$



雑音のエントロピー

■ 条件付きエントロピーの変形

$$H(y \mid s) = H(s + n \mid s) = H(n)$$

■ ガウス分布のエントロピー

$$P(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{n^2}{2\sigma^2}}$$

$$H(n) = -\int P(n) \log_2 P(n) \mathrm{d}\, n = \frac{1}{2} \log_2 2\pi e \sigma^2 = \frac{1}{2} \log_2 2\pi e \frac{P_{\mathrm{n}}}{h^2}$$

通信路容量（実数）

■ 通信路容量

$$C_{\mathrm{R}} = \frac{1}{T} \max_{\mathrm{E}[s^2] \le P_{\mathrm{t}}} I(s;y) = \frac{1}{T} \max_{\mathrm{E}[s^2] \le P_{\mathrm{t}}} H(s+n) - H(n)$$

1つのシンボルの送信時間

■ 相互情報量の最大化

Fanoの不等式

$$H(s+n) \le \frac{1}{2}\log_2 2\pi e(P_{\mathrm{t}} + \frac{P_{\mathrm{n}}}{h^2}) = \frac{1}{2}\log_2 2\pi e(P_{\mathrm{t}} + \frac{P_{\mathrm{n}}}{G_{\mathrm{h}}})$$

$$C_{\mathrm{R}} = \frac{1}{T}\left(\frac{1}{2}\log_2 2\pi e(P_{\mathrm{t}} + \frac{P_{\mathrm{n}}}{G_{\mathrm{h}}}) - \frac{1}{2}\log_2 2\pi e\frac{P_{\mathrm{n}}}{G_{\mathrm{h}}}\right) = \frac{1}{2T}\log_2\left(1 + \frac{G_{\mathrm{h}}P_{\mathrm{t}}}{P_{\mathrm{n}}}\right)$$

受信信号対雑音電力比（SNR）

通信路容量（複素数）

■ 複素通信システム

$$s(t) = s_{\mathrm{R}}(t) + js_{\mathrm{I}}(t), \qquad P_{\mathrm{t}} = \mathrm{E}\left[|s(t)|^2\right]$$

$$\tilde{n}(t) = \tilde{n}_{\mathrm{R}}(t) + j\tilde{n}_{\mathrm{I}}(t), \qquad P_{\mathrm{n}} = \mathrm{E}\left[|\tilde{n}(t)|^2\right]$$

■ 通信路容量（複素システム）

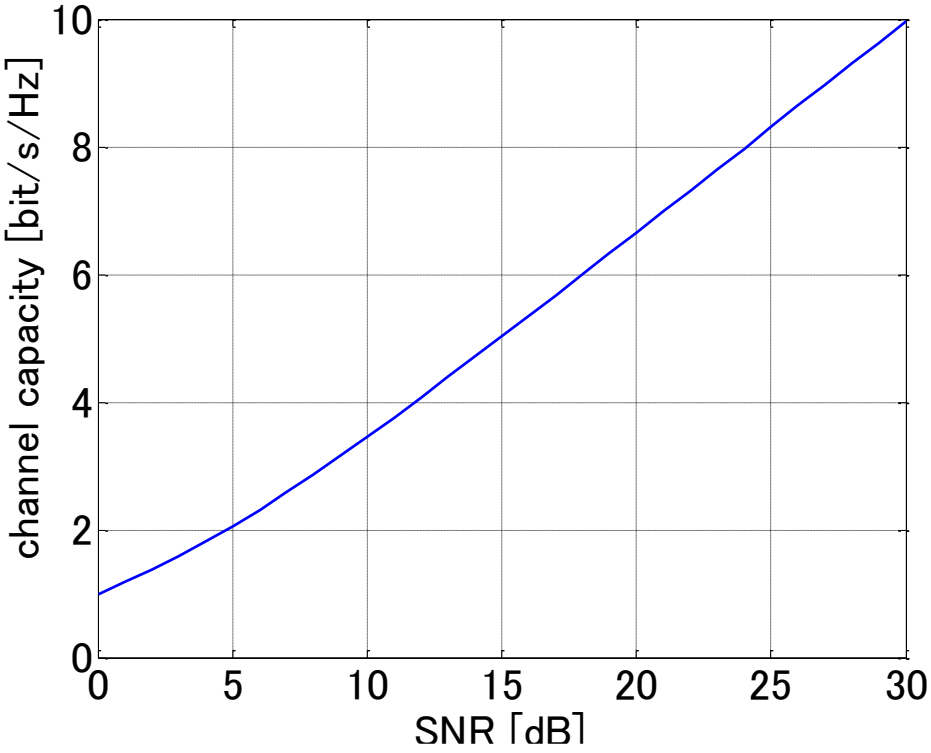
$$C_{\mathrm{R}} = \frac{1}{2T}\log_2\left(1 + \frac{G_{\mathrm{h}} P_{\mathrm{t}}/2}{P_{\mathrm{n}}/2}\right) \qquad C_{\mathrm{I}} = \frac{1}{2T}\log_2\left(1 + \frac{G_{\mathrm{h}} P_{\mathrm{t}}/2}{P_{\mathrm{n}}/2}\right)$$

$$C = \frac{2}{2T}\log_2\left(1 + \frac{G_{\mathrm{h}} P_{\mathrm{t}}/2}{P_{\mathrm{n}}/2}\right) = B\log_2(1+\gamma) = B \times R \ \ [\mathrm{bps}]$$

SNR　帯域幅　ビットレート

通信路容量

$$C = B\log_2(1+\gamma)\ [\mathrm{bps}]$$



帯域幅と中心周波数

■ 中心周波数と帯域幅

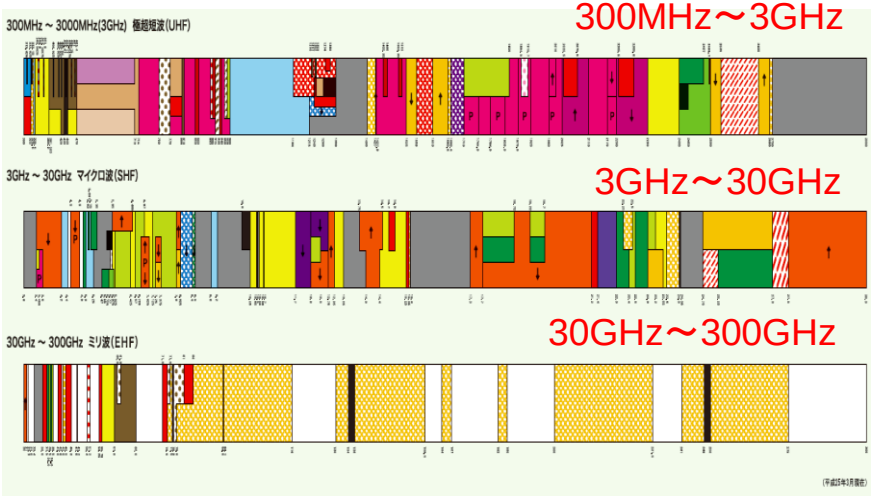
周波数資源とRF回路製作上の制約

$$B = a f_0$$

f_0 ：中心周波数 [Hz]

a ：比帯域（1%程度が現実）

日本の電波の使用状況

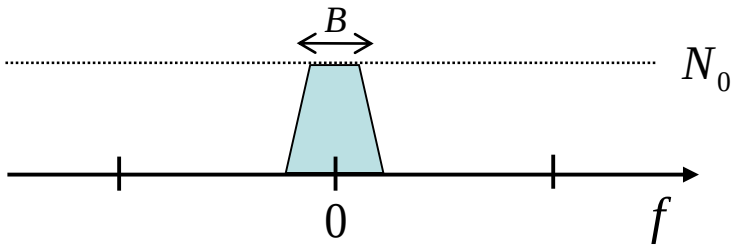


雑音電力

■ 熱雑音の電力

$$P_{\mathrm{n}} = N_0 B = kT_{\mathrm{emp}} B = \alpha N_0 f_0$$

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \ \ [\mathrm{Joules/K}]$$



■ 雑音電力の例

$$T_{\mathrm{emp}} = 290 \ \ [\mathrm{K}]$$

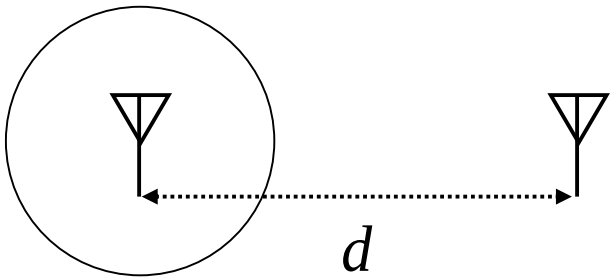
$$kT_{\mathrm{emp}} = -174 \ \ [\mathrm{dBm/Hz}]$$

$$B = 10 \ \ [\mathrm{MHz}] \rightarrow \ P_{\mathrm{n}} = -104 \ \ [\mathrm{dBm}]$$

伝搬損失

■ フリスの伝達公式

$$P_{\mathrm{r}} = A_{\mathrm{r}} \frac{G_{\mathrm{t}} P_{\mathrm{t}}}{4\pi d^2} = \left(\frac{\lambda_0}{4\pi d} \right)^2 G_{\mathrm{r}} G_{\mathrm{t}} P_{\mathrm{t}}$$



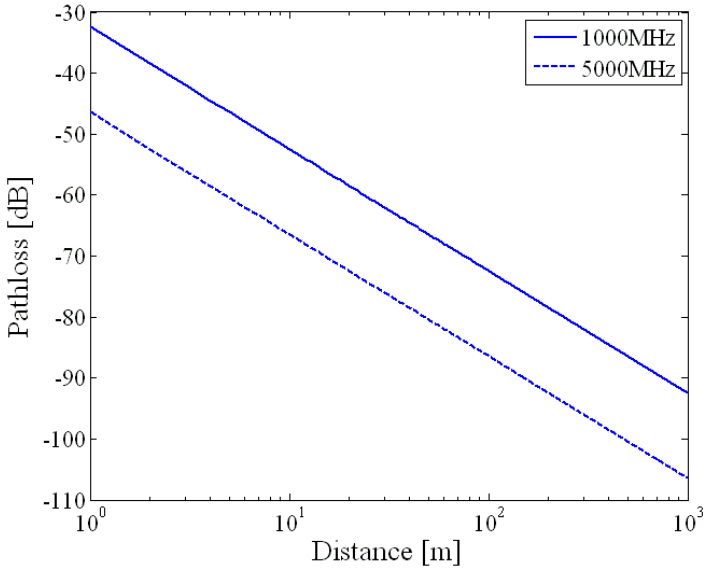
$$A_{\mathrm{r}} = G_{\mathrm{r}} \frac{\lambda_0^2}{4\pi}$$ アンテナ実効面積

■ 自由空間伝搬損失

$$G_{\mathrm{h}} = 10 \log_{10} \left(\frac{\lambda_0}{4\pi d} \right)^2$$

$$= 10 \log_{10} \left(\frac{c}{4\pi f_0 d} \right)^2$$

自由空間伝搬損失



カバレッジ

■ 受信SNRとカバレッジ

$$d_0 = \max d \ \ \text{s.t.} \ \ \gamma \geq \gamma_0$$

$$\gamma = \frac{G_\mathrm{h} P_\mathrm{t}}{P_\mathrm{n}} = \frac{P_\mathrm{t}}{\alpha f_0 B} \cdot \left(\frac{c}{4\pi f_0 d} \right)^2$$

■ カバレッジと周波数特性

$$d_0 = \frac{c}{4\pi f_0^{3/2}} \sqrt{\frac{P_\mathrm{t}}{\alpha N_0 \gamma_0}}$$

数値例

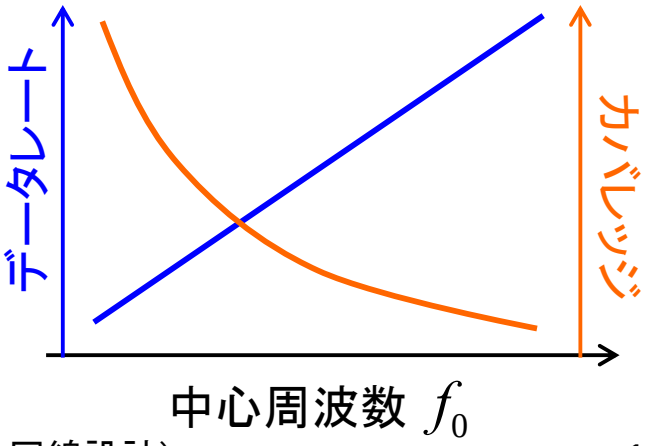
$$P_\mathrm{t} = 1[\mathrm{mW}] = 0[\mathrm{dBm}]$$

$$G_\mathrm{h} \cong -85[\mathrm{dB}] @ 5[\mathrm{GHz}], 100[\mathrm{m}]$$

$$P_\mathrm{n} = -104[\mathrm{dBm}] @ 10[\mathrm{MHzBW}]$$

$$\gamma = 19[\mathrm{dB}] \quad R \cong 6[\mathrm{bps/Hz}]$$

データレートとカバレッジ

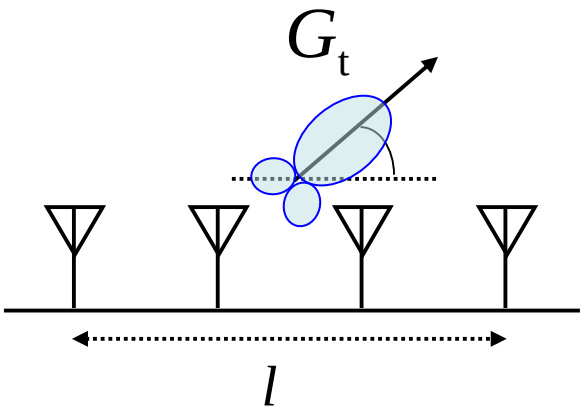


アンテナ

■ アンテナ利得と受信電力

$$P_{\mathrm{r}} = G_{\mathrm{h}} G_{\mathrm{r}} G_{\mathrm{t}} P_{\mathrm{t}}$$

$$\gamma = \frac{G_{\mathrm{h}} G_{\mathrm{r}} G_{\mathrm{t}} P_{\mathrm{t}}}{P_{\mathrm{n}}}$$



■ アンテナ利得とカバレッジ

等方性: $G_{\mathrm{r}} = 1$

線状アレー: $G_{\mathrm{t}} = \dfrac{l}{\lambda_0} G_{\mathrm{t0}} = \dfrac{l}{c} f_0 G_{\mathrm{t0}} \longrightarrow d_0 = \dfrac{c}{4\pi f_0} \sqrt{\dfrac{l G_{\mathrm{t0}} P_{\mathrm{t}}}{\alpha c N_0 \gamma_0}}$

多重アクセス

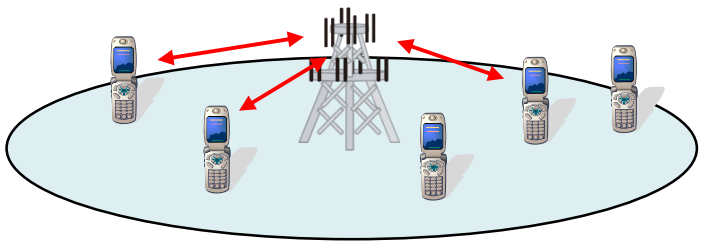
■ ユーザレート

$$C_{\mathrm{UE}} = \frac{B\log_2(1+g)}{N_{\mathrm{UE}}} \quad \text{[bps/user]}$$

$N_{\mathrm{UE}} = \pi d_0^2 \eta$ ：カバレッジ内の端末数

η ：端末密度（一様分布）[台/m²]

多重アクセス環境



■ セルエッジ（カバレッジ端）ユーザレート

$G_{\mathrm{t}} = \frac{l}{c} f_0 G_{\mathrm{t0}}$ のとき

$$C_{\mathrm{UE0}} = \frac{\alpha f_0 \log_2(1+\gamma_0)}{\pi d_0^2 \eta} \longrightarrow C_{\mathrm{UE0}} = \frac{16\pi\alpha^2 N_0 \gamma_0 \log_2(1+\gamma_0)}{c\eta l G_{\mathrm{t0}} P_{\mathrm{t}}} f_0^3$$

無線アクセスの設計例

- 受動型

  従来の無線システムの設計:

$$f_0, B, P_\mathrm{t} \longrightarrow d_0^\mathrm{req} \longrightarrow G_\mathrm{t} \longrightarrow C_\mathrm{UE0}$$

- 能動型

  高周波・小セル無線システムの設計:

$$C_\mathrm{UE0}^\mathrm{req} \longrightarrow N_\mathrm{UE}, C \longrightarrow d_0, B, R \longrightarrow f_0, P_\mathrm{t}, G_\mathrm{t}$$

- P2P型

  衛星通信など:

$$d_0^\mathrm{req}, C_0^\mathrm{req} \longrightarrow f_0, B, P_\mathrm{t} \longrightarrow R \longrightarrow G_\mathrm{t}$$

まとめ

- 通信路容量

$$C = B\log_2(1+\gamma) = \alpha \times f_0 \times R \ \text{[bps]}$$

- フリスの伝達公式

$$P_\mathrm{r} = \left(\frac{\lambda_0}{4\pi d}\right)^2 G_\mathrm{r} G_\mathrm{t} P_\mathrm{t} \qquad \gamma = \left(\frac{\lambda_0}{4\pi \mathrm{d}}\right)^2 \cdot \frac{G_\mathrm{r} G_\mathrm{t} P_\mathrm{t}}{P_\mathrm{n}}$$

- 多重アクセスを考慮したユーザレート

$$C_\mathrm{UE} = \frac{B\log_2(1+\gamma)}{N_\mathrm{UE}} = \frac{B\log_2(1+\gamma)}{\pi d_0^2 \eta}$$

- 無線アクセスの設計

$$C_\mathrm{UE0}^\mathrm{req} \longrightarrow N_\mathrm{UE}, C \longrightarrow d_0, B, R \longrightarrow f_0, P_\mathrm{t}, G_\mathrm{t}$$