

修士論文

ピーク検出に基づくキャリアセンスを
用いた LPWAN のカバレッジ確率の下限值

令和 5 年度

三重大学大学院 工学研究科 情報工学専攻

422M512 川島 朋幸

目次

| | | |
|-----|-------------------------------------|----|
| 第1章 | 序論 | 2 |
| 1.1 | はじめに | 2 |
| 1.2 | 本論文の構成 | 3 |
| 第2章 | システムモデル | 4 |
| 2.1 | LPWAN モデル | 4 |
| 2.2 | 条件付きカバレッジ確率 | 5 |
| 2.3 | キャリアセンス | 6 |
| 第3章 | 提案法 | 7 |
| 3.1 | 概要 | 7 |
| 3.2 | キャリアセンス条件の導出 | 8 |
| 3.3 | キャリアセンス条件を付加した条件付きカバレッジ確率 | 22 |
| 第4章 | 数値実験 | 23 |
| 第5章 | おわりに | 26 |
| | 本研究に関連する研究業績 | 27 |
| | 謝辞 | 28 |
| | 参考文献 | 29 |

第 1 章

序論

1.1 はじめに

近年、Internet of Things (IoT) が社会に広く普及している。IoT は様々なデバイスやセンサがインターネットに接続され、データをやり取りすることにより、デバイス同士が通信し、情報の収集や制御が可能になるシステムである。身近なところではエアコンやロボット掃除機などが挙げられる。それらがインターネットに接続されることで、屋外から遠隔操作できるようになった。

IoT 向けの無線通信方式の一つである Low Power Wide Area Network (LPWAN) が注目されている [1]。LPWAN は Wi-Fi や Bluetooth などの短距離無線通信規格と異なり長距離通信が可能で、低いデータレートと省電力を特徴に持つため、少量データを定期的に送信するようなセンサネットワークの構築において優位性がある。また、構築コストが比較的安く、大規模なセンサネットワークを構築しやすい。例えば、birdz 社は、フランス全土で 300 万台を超える水道メーターを LPWAN で接続し、水資源管理に活用している [2]。また、亜太電信社は、台北市を中心に 500 箇所に IoT スポットを設置し、台湾を IoT スマートアイランドにする計画を行っている [3]。また、LPWAN の長距離通信を利用した電力量監視システムも提案されている [4]。LPWAN は、Long-Range (LoRa) [5] や Sigfox [6] など、免許不要な無線通信規格が策定されている。

一般的に LPWAN は多数のエンドデバイス (ED) と ED からのデータを集約するゲートウェイ (GW) からなるスター型ネットワークで構成されている [7]。LPWAN では、ED が多いとパケット衝突が発生し、パケット送信の成功確率が低下するため、ネットワーク内の通信の品質や効率が低下する。したがって、安定した無線センサネットワークを構築するには、ネットワークの評価指標が重要となる。本研究では、ネットワークの

評価指標として、通信が成功する確率を意味するカバレッジ確率を用いる。従来研究では、GWにて所望信号の受信中に干渉信号が到来した場合を仮定した条件付きカバレッジ確率が導出され、LPWANが収容できるED数を評価するために使用されてきた[9]。また、信号電力対雑音比(signal power-to-noise ratio:SNR)と信号電力対干渉比(signal power-to-interference ratio:SIR)を考慮した累積容量分布によってカバレッジ条件が判断されており、本研究でもこれを用いる。さらに、複数の干渉信号環境において収容可能ED数下限値を求める研究も行われている[10]。本研究では、単一の干渉信号環境下のLPWANにおいて、ピーク検出に基づくキャリアセンスを付加した場合の新たな条件付きカバレッジ確率を導出し、カバレッジ確率の下限値を導出する。

1.2 本論文の構成

本論文は以下のように構成される。まず、第2章でカバレッジ確率および収容可能ED数の下限値を導出するためのLPWANシステムモデルを示す。そしてキャリアセンスについて説明した後、第3章でキャリアセンスを付加した新たなカバレッジ確率の導出式を示す。第4章で数値実験結果を示した後、カバレッジ確率の下限値を導出する。最後に第5章で本研究の結論を述べる。

第2章

システムモデル

2.1 LPWAN モデル

単一の干渉信号環境に対する条件付きカバレッジ確率を導出するために，通信エリアの半径を R_M とした LPWAN モデルを考える．システムモデルを図 2.1 に示す．通信エリア内の半径 R_M の円と内半径 R_G の円で囲まれた領域 G 内に ED が一様分布に従って配

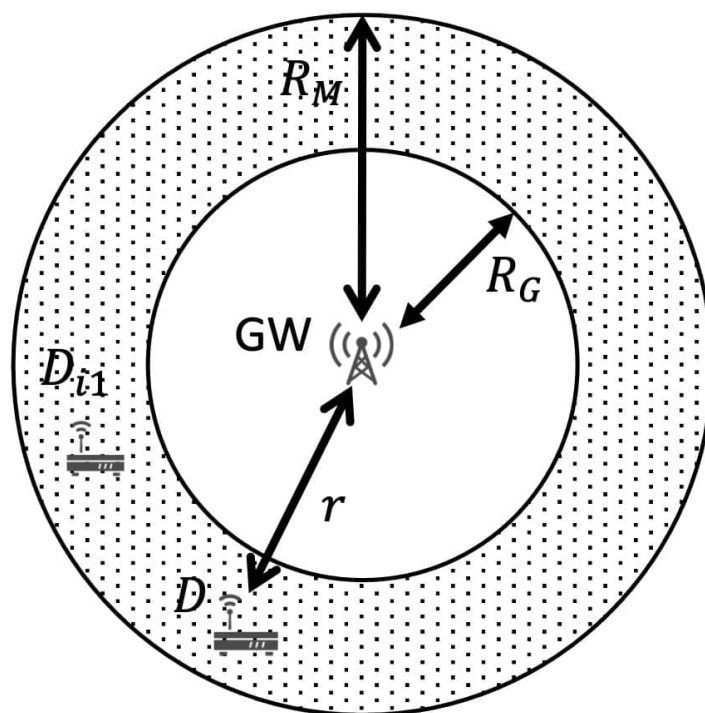


図 2.1 システムモデル

置されている。ED が信号を送信し、GW が信号を受信する。このとき、円の中心に位置する GW と D の距離を表す R の確率密度関数は、以下で定義される [11].

$$f_{R|D \in G}(r) = \frac{2 \cdot r / R_M^2}{1 - (R_G / R_M)^2} \quad (2.1)$$

また、伝搬モデルには、シャドウイングによる減衰を伴う対数正規分布に従う距離減衰が含まれるため、GW での SNR を表す Γ は次式で与えられる。

$$\Gamma = P_{Tx} + G_{Ant} - K - 10\eta \log_{10}(r) - P_{Noise} - X_\delta \quad (2.2)$$

Γ は平均 $\mu(r) = \Gamma_{R_M} - 10\eta \log(r/R_M)$ dB, 分散 δ_x^2 の正規分布に従う。ただし、 $\eta, X_\delta, P_{Tx}, G_{Ant}, K, P_{Noise}, \Gamma_{R_M}$ はそれぞれ、経路損失指数、シャドウイングパラメータ、送信電力、アンテナゲイン、損失、雑音電力、半径 R_M での SNR である。上述の伝搬モデルにおける D の SNR の確率密度関数は次のように表せる。

$$f_{\Gamma|D \in G}(\gamma) = \int_{R_G}^{R_M} \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta_x^2}} \exp\left(-\frac{(\gamma - \mu(r))^2}{2\delta_x^2}\right) \cdot f_{R|D \in G}(r) dr \quad (2.3)$$

2.2 条件付きカバレッジ確率

LPWAN において多数の ED があるとき、GW が所望信号の受信中に他の信号（干渉信号）が到来すると所望信号を正しく受信できない場合がある。このとき、所望信号受信中に干渉信号が到来した瞬間の所望信号の受信成功確率が条件付きカバレッジ確率と定義されている。そして、干渉信号がない場合の条件付きカバレッジ確率 $P_{cv|0}(R_M)$ と干渉信号が一つの場合の条件付きカバレッジ確率 $P_{cv|1}(R_M)$ が次のように定義される。

$$P_{cv|0}(R_M) = \int_{\Gamma_{cv}}^{\Gamma_{GW}} f_{\Gamma|D \in G}(\gamma) d\gamma \quad (2.4)$$

$$P_{cv|1}(R_M) = \int_{\Gamma'}^{\Gamma_{GW}} \int_{\Gamma_{R_M} - 3\delta_x}^{\Gamma_{GW}} \Phi_c(\gamma, \gamma_{i1}) \cdot f_{\Gamma|D \in G}(\gamma) \cdot f_{\Gamma_{i1}|D_{i1} \in G}(\gamma_{i1}) d\gamma d\gamma_{i1} \quad (2.5)$$

$$\Phi_c(\gamma, \gamma_{i1}) = \begin{cases} 1 & \gamma \geq \Gamma_{cv}(\gamma - \gamma_{i1}) \\ 0 & \gamma < \Gamma_{cv}(\gamma - \gamma_{i1}) \end{cases} \quad (2.6)$$

ただし, $\gamma_{i1}, \Phi_c(\gamma, \gamma_{i1}), \Gamma_{GW}, \Gamma_{R_M}, \Gamma_{cv}(\gamma - \gamma_{i1}), \Gamma_M$ はそれぞれ ED D_{i1} からの干渉信号の SNR (単位: dB), カバレッジ条件, 半径 R_G での SNR, 半径 R_M での SNR, 所望信号と干渉信号の SIR $\gamma - \gamma_{i1}$ でビット誤り率が 10^{-5} より小さくなる SNR 閾値, 最大カバレッジ距離での平均 SNR (受信感度) である. また, シャドウイングによる減衰の範囲は $\pm 3\delta_x$ 区間で考える. Γ' は所望信号がとりうる SNR の値の下限値であり次式で与えられる.

$$\Gamma' = \begin{cases} \Gamma_{R_M} - 3\delta_x & \Gamma_{R_M} - 3\delta_x \geq \Gamma_M \\ \Gamma_M & \Gamma_{R_M} - 3\delta_x < \Gamma_M \end{cases} \quad (2.7)$$

カバレッジ条件 Φ_c の SNR 閾値 $\Gamma_{cv}(\gamma - \gamma_{i1})$ を図 2.2 に示す.

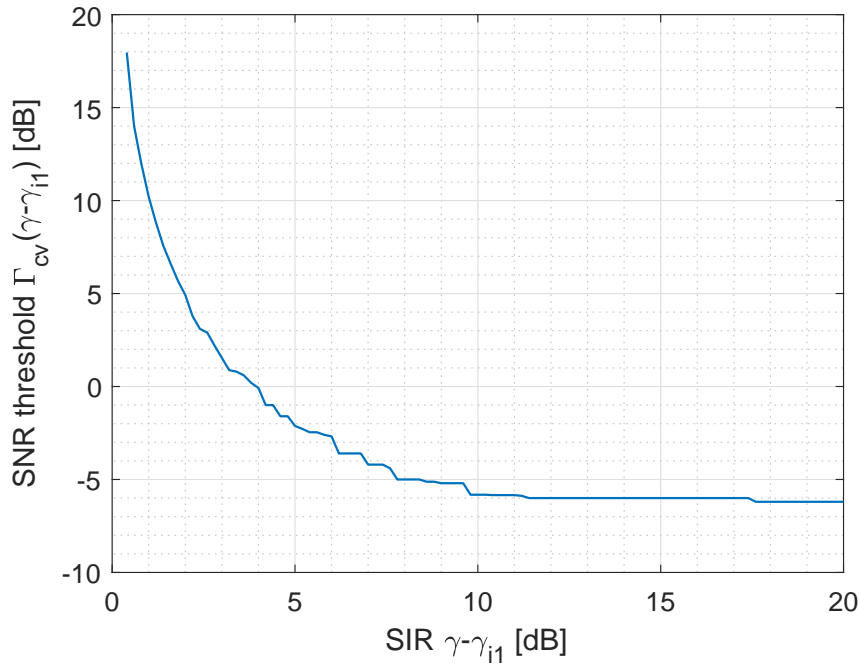


図 2.2 SNR 閾値と SIR の関係

2.3 キャリアセンス

キャリアセンスは自機が送信を開始する前に他の無線機が送信中であることを確認し, 他機が送信中であれば, 自機は送信を行わないことで干渉を回避する仕組みである. 日本の 920MHz 帯では, 多くのケースにおいてピーク検出に基づくキャリアセンスが定められており, その時間や条件が細かく規定されている [8].

第 3 章

提案法

3.1 概要

本論文では，前述のキャリアセンスによる所望 ED が信号の送信可否を判断する条件をキャリアセンス条件として，条件付きカバレッジ確率の導出式に組み込む．キャリアセンス条件は 0 から 1 の間の値を取り，1 をとるとき，所望 ED は送信を行わない．本章では，条件付きカバレッジ確率と合わせて用いるためのキャリアセンス条件を導く．

図 3.1 に ED の存在領域とキャリアセンス範囲についての一例を示す．色付きのドーナツ部分は同じ SNR を持つときの各 ED の存在範囲である．GW を中心とした二次元平面において，キャリアセンス条件の導出はキャリアセンス円（半径 $r_{cs}(m)$ ）と干渉 ED の存在領域との重なりを考え導出するため，ED の方向等の位置関係を考慮しなければならず SNR のままでは計算することができない．よって，キャリアセンス条件の導出では各 ED の SNR を距離に変換して計算を行う．

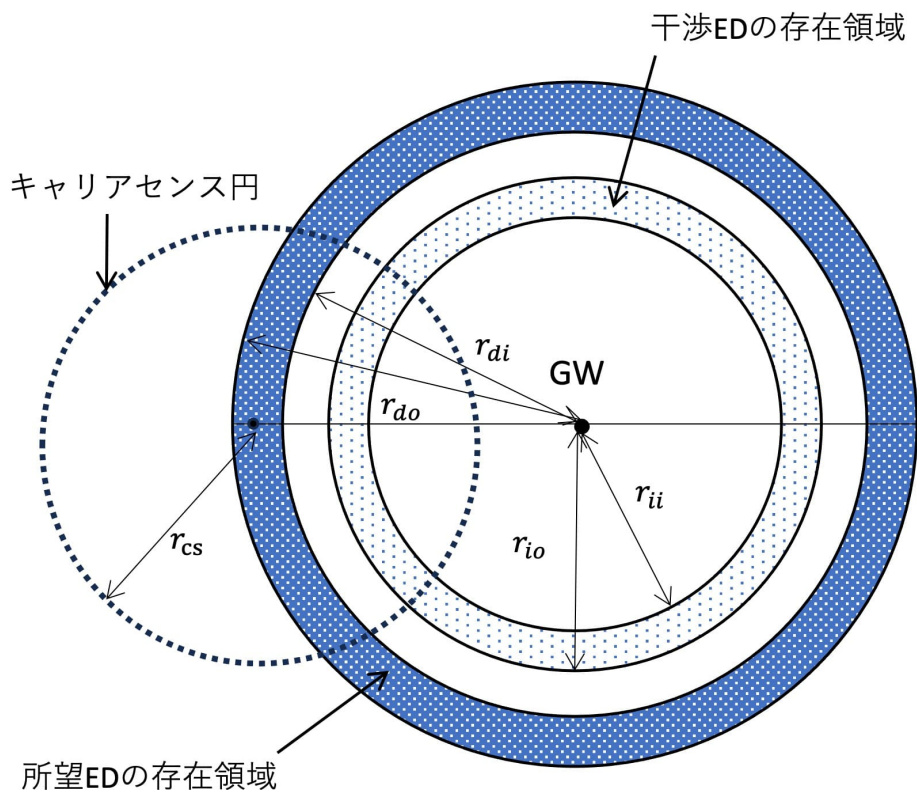


図 3.1 ED の存在領域とキャリアセンス範囲

3.2 キャリアセンス条件の導出

まず、図 3.2 に示すように、所望 ED と干渉 ED の位置関係に応じて 3 パターンに分けられる。a) 所望 ED と干渉 ED の存在領域に重なりがない、b) 所望 ED と干渉 ED の存在領域に重なりがある、c) 所望 ED と干渉 ED の片方がもう一方を内包する、の 3 つである。また、それぞれにおいて所望 ED と干渉 ED の位置関係が逆になっている場合も考慮する。各パターンにおいて、キャリアセンス範囲と干渉 ED の重なるの割合を求め（干渉 ED の存在領域をキャリアセンス円がオーバーラップする割合）、それをキャリアセンス条件として用いる。以下に、上記の各パターンにおけるキャリアセンス条件導出の計算式を示す。

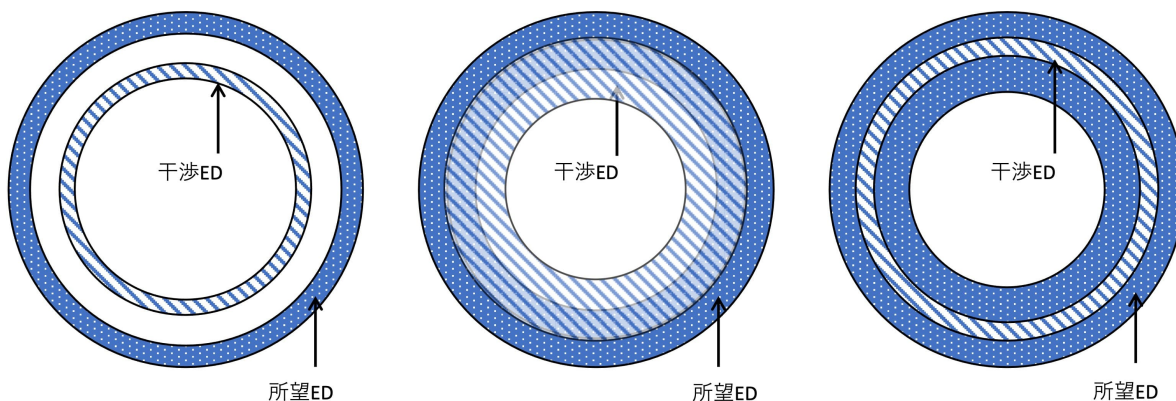


図 3.2 ED の位置関係

a) 所望 ED と干渉 ED の存在領域に重なりがない場合

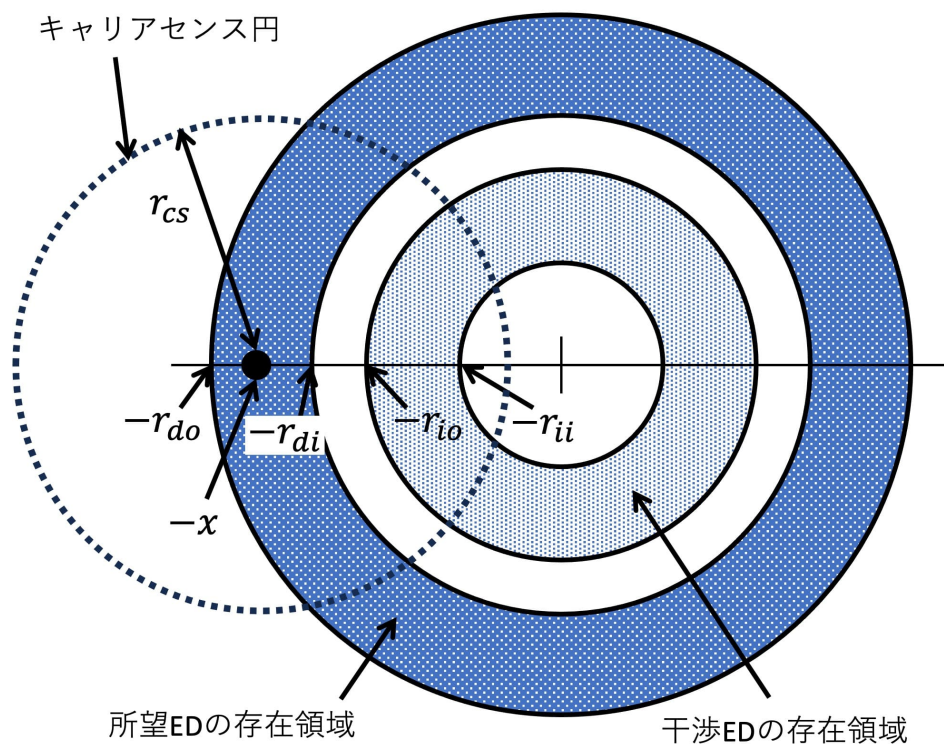


図 3.3 $r_{do} > r_{di} \geq r_{io} > r_{ii}$

GW を原点とする二次元平面上において、例えば ED が図 3.3 に示すような位置関係の場合を考える。ただし、 $r_{do}, r_{di}, r_{io}, r_{ii}$ はそれぞれ所望 ED の外半径、所望 ED の内半径、干渉 ED の外半径、干渉 ED の内半径である。このとき $r_{do} > r_{di} \geq r_{io} > r_{ii}$ の関係を満

たす. 所望 ED はドーナツ領域内に分布しているので, キャリアセンス円の中心はこの領域内に存在する. 二次元平面の水平軸を X 軸とし右方向を正とする. キャリアセンス円の X 軸上の中心座標を x とするとき, 所望 ED の存在領域が X 軸上でとりうる範囲は r_{di} から r_{do} であるので $r_{di} < x < r_{do}$ の関係を満たす. また, ED はドーナツ領域に一様分布に存在しているとする.

キャリアセンス円の中心座標 x が $-r_{do}$ から $-r_{di}$ の範囲に存在するとき, キャリアセンス条件 $\Phi_{cs}(\gamma, \gamma_{i1})$ は以下で求まる.

$$\Phi_{cs}(\gamma, \gamma_{i1}) = \int_{-r_{do}}^{-r_{di}} f_{cs} \cdot \left(\frac{1}{r_{do} - r_{di}} \right) \quad (3.1)$$

ED の位置関係が図 3.3 のような関係のとき, キャリアセンス条件式 f_{cs} は以下で求まる.

$$f_{cs} = \begin{cases} 0 & -x + r_{cs} \leq -r_{io} \\ f_o/S & -r_{io} < -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (f_o - f_i)/S & -r_{ii} < -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases} \quad (3.2)$$

ただし, f_o, f_i, S はキャリアセンス円と半径 r_{io} の円との共通部分面積, キャリアセンス円と半径 r_{ii} の円との共通部分面積, 干渉 ED の存在領域面積である. 最上段の $-x + r_{cs} \leq -r_{io}$ の条件について, この条件を満たすとき, キャリアセンス円と干渉 ED の存在領域との重なりはない. したがって $f_{cs} = 0$ となる. 一方最下段の条件の $r_{io} \leq -x + r_{cs}$ については, このときキャリアセンス円は干渉 ED の存在領域をすべてカバーできる. したがって $f_{cs} = 1$ となる. その他の条件を満たすときはキャリアセンス円と干渉信号の存在領域に重なりがあるときである.

図 3.4 に示すように ED の位置関係が逆のとき, 満たすべき条件は $r_{io} > r_{ii} \geq r_{do} > r_{di}$.

図 3.5 はキャリアセンス円の中心と干渉 ED の存在領域について X 軸上での位置関係を単純化したものである. 図中の番号はキャリアセンス円の中心座標 x と干渉 ED の各半径 ($r_{io}, r_{ii}, -r_{io}, -r_{ii}$) との距離を近い順に番号付けしたものである. 図 3.5 の場合, x と $r_{ii}, -r_{io}$ との距離の大小 ($|-x - (-r_{io})|$ と $|r_{ii} - (-x)|$) によって 3 パターンに分けられる. $|-x - (-r_{io})| < |r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} 0 & -r_{ii} \leq -x - r_{cs} \\ (\pi r_{cs}^2 - f_i)/S & -r_{io} \leq -x - r_{cs} < -r_{ii} \\ (f_o - f_i)/S & -x - r_{cs} < -r_{io} \text{かつ} -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

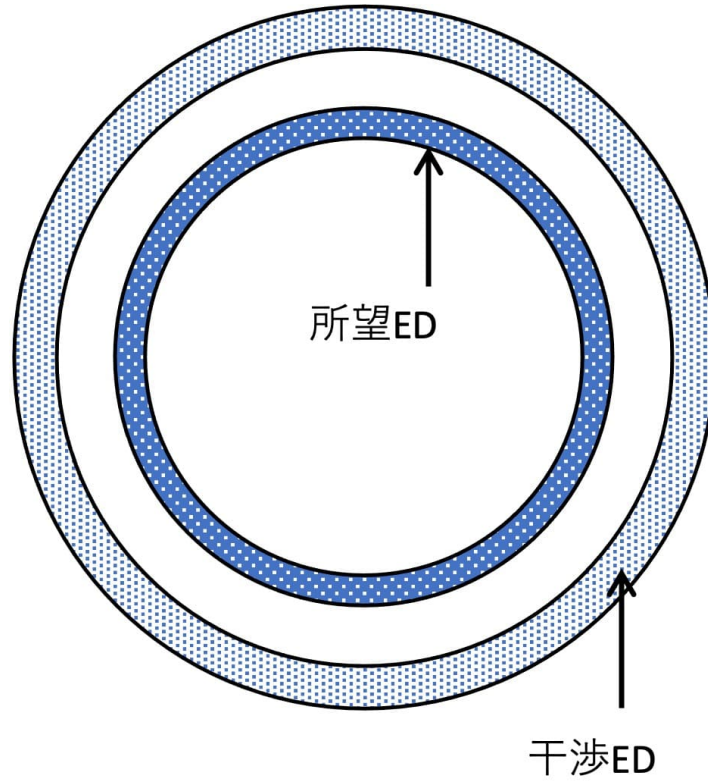


図 3.4 $r_{io} > r_{ii} \geq r_{do} > r_{di}$

$|-x - (-r_{io})| > |r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} 0 & -r_{ii} \leq -x - r_{cs} \\ (\pi r_{cs}^2 - f_i)/S & -x - r_{cs} < -r_{ii} \text{かつ} -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (\pi r_{cs}^2 - \pi r_{ii}^2)/S & -r_{io} \leq -x - r_{cs} \text{かつ} r_{ii} \leq -x + r_{cs} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & -x - r_{cs} < -r_{io} \text{かつ} -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

$|-x - (-r_{io})| = |r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} 0 & -r_{ii} \leq -x - r_{cs} \\ (\pi r_{cs}^2 - f_i)/S & -r_{io} < -x - r_{cs} < -r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

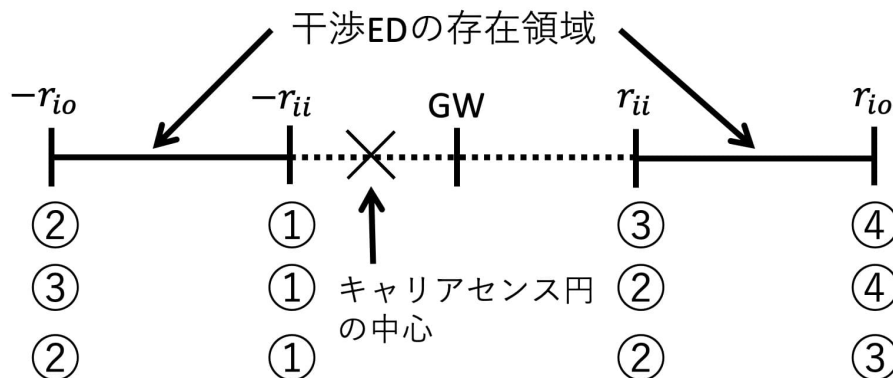


図 3.5 位置関係

b) 所望 ED と干渉 ED の存在領域に重なりがある場合

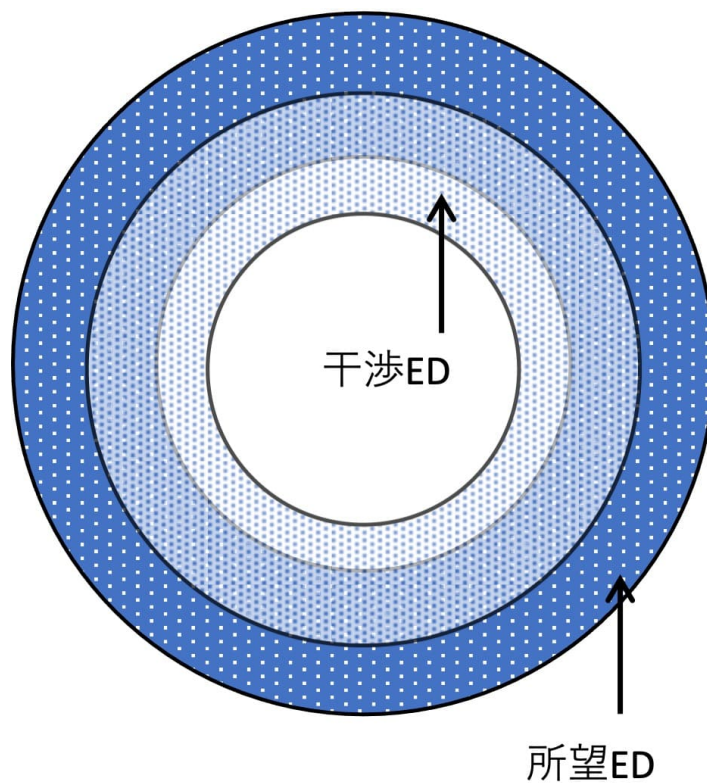


図 3.6 $r_{do} \geq r_{io} > r_{di} > r_{ii}$

図 3.6 のような関係のとき、満たすべき条件は、 $r_{do} \geq r_{io} > r_{di} > r_{ii}$ である。

図 3.7 は所望 ED と干渉 ED の位置関係を単純化したものである。このとき、 $-r_{io}$ と x

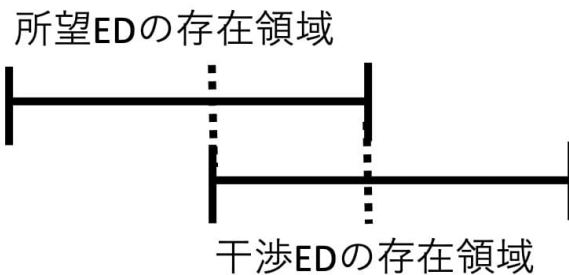


図 3.7 位置関係

の値の大小で場合分けがされる. $-x < -r_{io}$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} 0 & -x + r_{cs} \leq -r_{io} \\ f_o/S & -r_{io} < -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (f_o - f_i)/S & -r_{ii} < -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

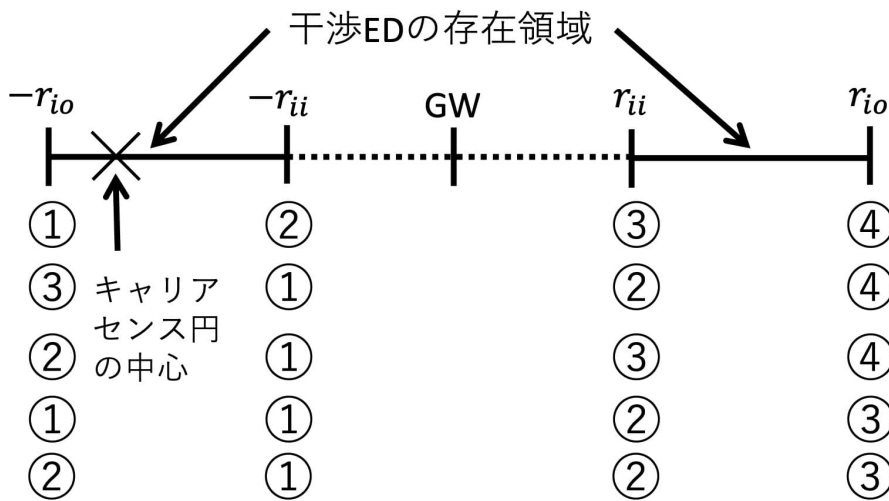


図 3.8 位置関係

$-r_{io} \leq -x$ のとき, 図 3.8 に示すように 5 パターンに分けられる.

$|-x - (-r_{io})| < |-r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} \pi r_{cs}^2/S & -r_{io} \leq -x - r_{cs} \\ f_o/S & -x - r_{cs} < -r_{io} \text{かつ} -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (f_o - f_i)/S & -r_{ii} < -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

$|-x - (-r_{io})| > |-r_{ii} - (-x)|$ かつ $|r_{ii} - (-x)| < |-x - (-r_{io})|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} \pi r_{cs}^2/S & -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (\pi r_{cs}^2 - f_i)/S & -r_{ii} < -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (\pi r_{cs}^2 - \pi r_{ii}^2)/S & -r_{io} \leq -x - r_{cs} \text{かつ} r_{ii} \leq -x + r_{cs} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & -x - r_{cs} < -r_{io} \text{かつ} -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

$|-x - (-r_{io})| > |-r_{ii} - (-x)|$ かつ $|r_{ii} - (-x)| > |-x - (-r_{io})|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} \pi r_{cs}^2/S & -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (\pi r_{cs}^2 - f_i)/S & -r_{io} \leq -x - r_{cs} \text{かつ} -r_{ii} < -x + r_{cs} \\ (f_o - f_i)/S & -x - r_{cs} < -r_{io} \text{かつ} -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

$|-x - (-r_{io})| = |-r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} \pi r_{cs}^2/S & -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (f_o - f_i)/S & -r_{ii} < -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

$|-x - (-r_{io})| > |-r_{ii} - (-x)|$ かつ $|r_{ii} - (-x)| = |-x - (-r_{io})|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} \pi r_{cs}^2/S & -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (\pi r_{cs}^2 - f_i)/S & -r_{ii} < -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

図 3.9 に示すように ED の位置関係が逆のとき, 満たすべき条件は $r_{io} \geq r_{do} > r_{ii} > r_{di}$.

図 3.10 に ED の位置関係を示す. $-x \leq -r_{ii}$ のとき, 図 3.11 左に示すように 5 パターンに分けられる. $|-x - (-r_{io})| < |-r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} \pi r_{cs}^2/S & -r_{io} \leq -x - r_{cs} \\ f_o/S & -x - r_{cs} < -r_{io} \text{かつ} -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (f_o - f_i)/S & -r_{ii} < -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

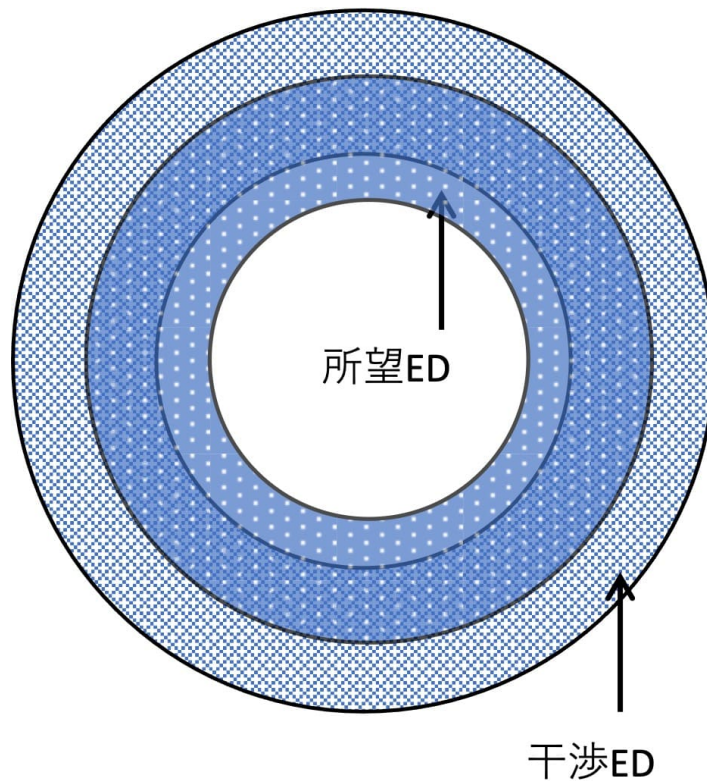


図 3.9 $r_{io} \geq r_{do} > r_{ii} > r_{di}$

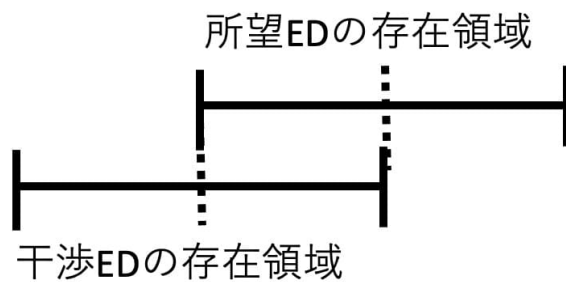


図 3.10 位置関係

$|-x - (-r_{io})| > |-r_{ii} - (-x)|$ かつ $|-x - (-r_{io})| < |r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} \pi r_{cs}^2 / S & -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (\pi r_{cs}^2 - f_i) / S & -r_{io} \leq -x - r_{cs} \text{ かつ } -r_{ii} < -x + r_{cs} \\ (f_o - f_i) / S & -x - r_{cs} < -r_{io} \text{ かつ } -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2) / S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

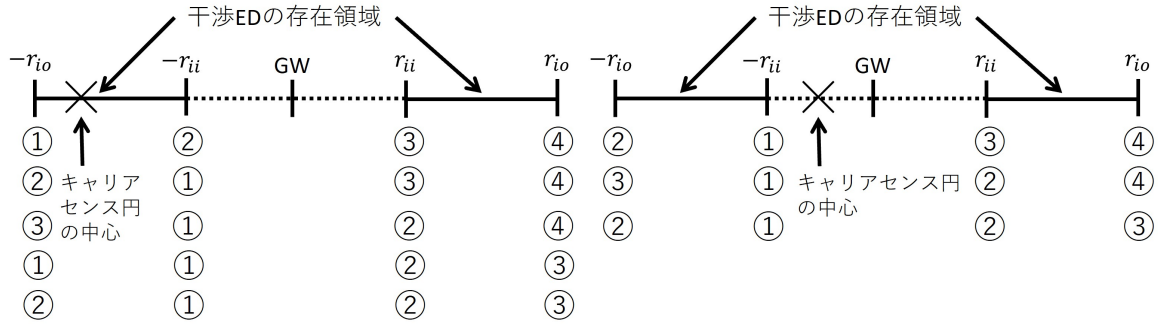


図 3.11 位置関係

$|-x - (-r_{io})| > |-r_{ii} - (-x)|$ かつ $|-x - (-r_{io})| > |r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} \pi r_{cs}^2 / S & -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (\pi r_{cs}^2 - f_i) / S & -r_{ii} < -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (\pi r_{cs}^2 - \pi r_{ii}^2) / S & -r_{io} \leq -x - r_{cs} \text{ かつ } r_{ii} \leq -x + r_{cs} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2) / S & -x - r_{cs} < -r_{io} \text{ かつ } -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

$|-x - (-r_{io})| = |-r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} \pi r_{cs}^2 / S & -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (f_o - f_i) / S & -r_{ii} < -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2) / S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

$|-x - (-r_{io})| > |-r_{ii} - (-x)|$ かつ $|-x - (-r_{io})| = |r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} \pi r_{cs}^2 / S & -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (\pi r_{cs}^2 - f_i) / S & -r_{ii} < -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2) / S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

また $-r_{ii} < -x$ のとき, 図 3.11 右に示すように 3 パターンに分けられる. $|-x - (-r_{io})| < |r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} 0 & -r_{ii} \leq -x - r_{cs} \\ (\pi r_{cs}^2 - f_i) / S & -r_{io} \leq -x - r_{cs} < -r_{ii} \\ (f_o - f_i) / S & -x - r_{cs} < -r_{io} \text{ かつ } -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2) / S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

$|-x - (-r_{io})| > |r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} 0 & -r_{ii} \leq -x - r_{cs} \\ (\pi r_{cs}^2 - f_i)/S & -x - r_{cs} < -r_{ii} \text{かつ} -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (\pi r_{cs}^2 - \pi r_{ii}^2)/S & -r_{io} \leq -x - r_{cs} \text{かつ} r_{ii} \leq -x + r_{cs} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & -x - r_{cs} < -r_{io} \text{かつ} -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

$|-x - (-r_{io})| = |r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} 0 & -r_{ii} \leq -x - r_{cs} \\ (\pi r_{cs}^2 - f_i)/S & -r_{io} < -x - r_{cs} < -r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

c) 所望 ED と干渉 ED の片方がもう一方を内包する場合

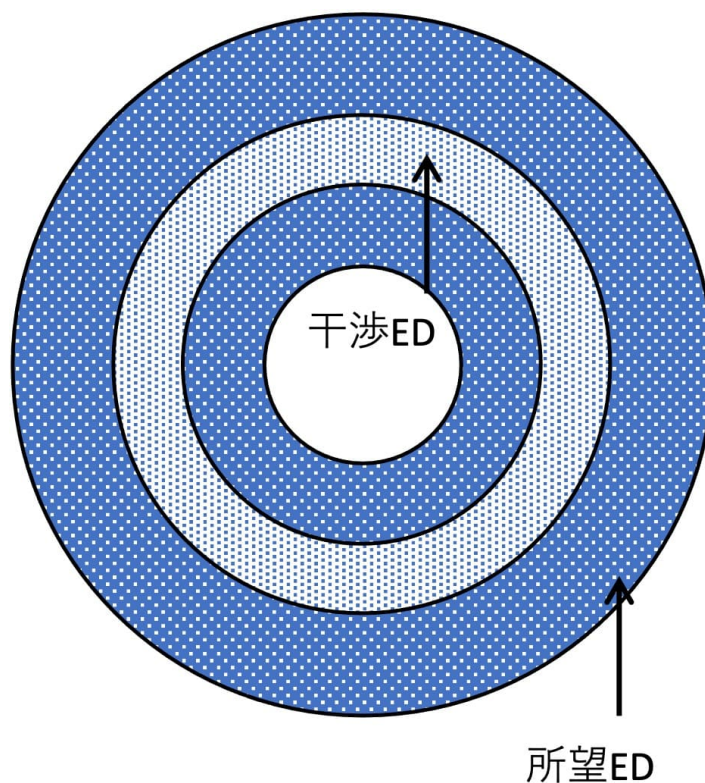


図 3.12 $r_{do} > r_{io} > r_{ii} \geq r_{di}$

図 3.12 に示すような関係のとき, 満たすべき条件は $r_{do} > r_{io} > r_{ii} \geq r_{di}$.



図 3.13 位置関係

図 3.13 に ED の位置関係を示す.

$-x < -r_{io}$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} 0 & -x + r_{cs} \leq -r_{io} \\ f_o/S & -r_{io} < -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (f_o - f_i)/S & -r_{ii} < -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

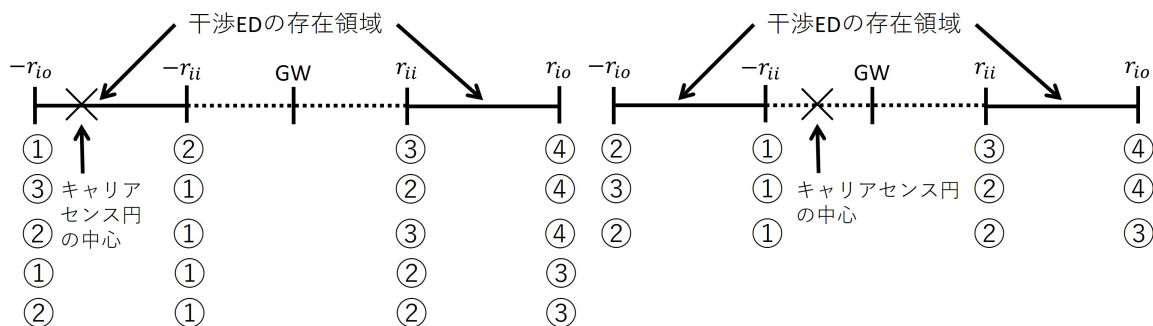


図 3.14 位置関係

図 3.14 左に示すように, $-r_{io} \leq -x \leq -r_{ii}$ のとき 5 パターンに分けられる. $|-x - (-r_{io})| < |-r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} \pi r_{cs}^2/S & -r_{io} \leq -x - r_{cs} \\ f_o/S & -x - r_{cs} < -r_{io} \text{かつ} -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (f_o - f_i)/S & -r_{ii} < -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

$|-x - (-r_{io})| > |-r_{ii} - (-x)|$ かつ $|-x - (-r_{io})| < |r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} \pi r_{cs}^2/S & -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (\pi r_{cs}^2 - f_i)/S & -r_{io} \leq -x - r_{cs} \text{ かつ } -r_{ii} < -x + r_{cs} \\ (f_o - f_i)/S & -x - r_{cs} < -r_{io} \text{ かつ } -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

$|-x - (-r_{io})| > |-r_{ii} - (-x)|$ かつ $|-x - (-r_{io})| > |r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} \pi r_{cs}^2/S & -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (\pi r_{cs}^2 - f_i)/S & -r_{ii} < -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (\pi r_{cs}^2 - \pi r_{ii}^2)/S & -r_{io} \leq -x - r_{cs} \text{ かつ } r_{ii} \leq -x + r_{cs} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & -x - r_{cs} < -r_{io} \text{ かつ } -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

$|-x - (-r_{io})| = |-r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} \pi r_{cs}^2/S & -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (f_o - f_i)/S & -r_{ii} < -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

$|-x - (-r_{io})| > |-r_{ii} - (-x)|$ かつ $|-x - (-r_{io})| = |r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} \pi r_{cs}^2/S & -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (\pi r_{cs}^2 - f_i)/S & -r_{ii} < -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

図 3.14 右に示すように, $-r_{ii} < -x$ のとき 3 パターンに分けられる. $|-x - (-r_{io})| < |r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} 0 & -r_{ii} \leq -x - r_{cs} \\ (\pi r_{cs}^2 - f_i)/S & -r_{io} \leq -x - r_{cs} < -r_{ii} \\ (f_o - f_i)/S & -x - r_{cs} < -r_{io} \text{ かつ } -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

$|-x - (-r_{io})| > |r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} 0 & -r_{ii} \leq -x - r_{cs} \\ (\pi r_{cs}^2 - f_i)/S & -x - r_{cs} < -r_{ii} \text{ かつ } -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (\pi r_{cs}^2 - \pi r_{ii}^2)/S & -r_{io} \leq -x - r_{cs} \text{ かつ } r_{ii} \leq -x + r_{cs} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & -x - r_{cs} < -r_{io} \text{ かつ } -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

$|-x - (-r_{io})| = |r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} 0 & -r_{ii} \leq -x - r_{cs} \\ (\pi r_{cs}^2 - f_i)/S & -r_{io} < -x - r_{cs} < -r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

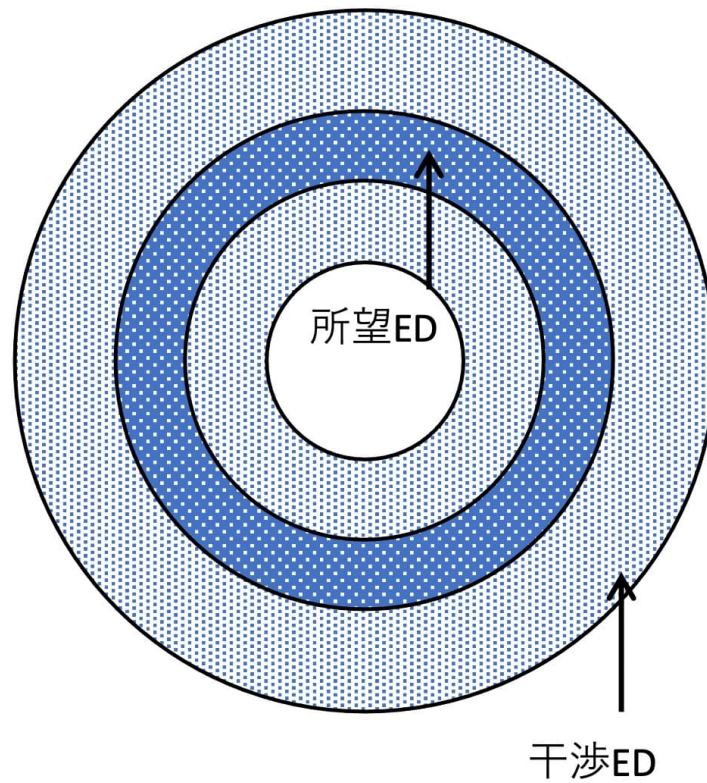


図 3.15 $r_{io} \geq r_{do} > r_{di} \geq r_{ii}$

図 3.15 に示すように ED の位置関係が逆のとき、満たすべき条件は $r_{io} \geq r_{do} > r_{di} \geq r_{ii}$.

このとき、図 3.16 に示すように 5 パターンに分けられる。 $|-x - (-r_{io})| < |-r_{ii} - (-x)|$ のとき、

$$f_{cs} = \begin{cases} \pi r_{cs}^2/S & -r_{io} \leq -x - r_{cs} \\ f_o/S & -x - r_{cs} < -r_{io} \text{かつ} -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (f_o - f_i)/S & -r_{ii} < -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2)/S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

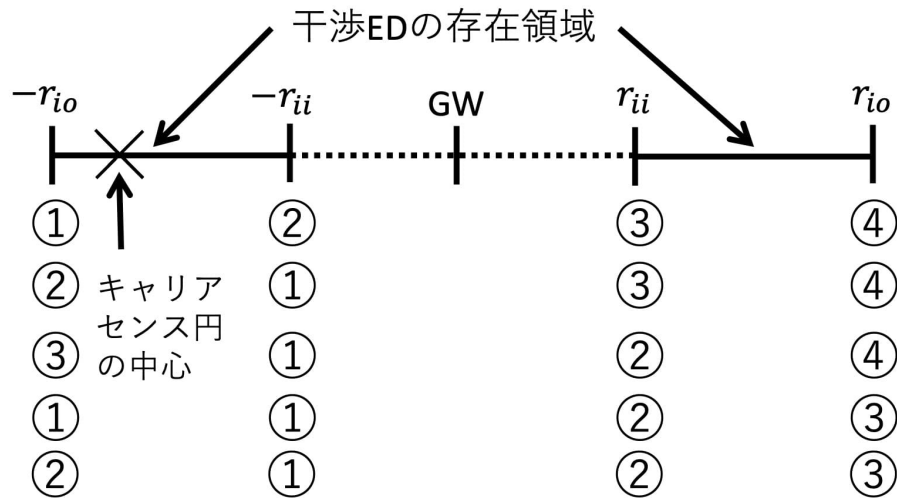


図 3.16 位置関係

$|-x - (-r_{io})| > |-r_{ii} - (-x)|$ かつ $|-x - (-r_{io})| < |r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} \pi r_{cs}^2 / S & -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (\pi r_{cs}^2 - f_i) / S & -r_{io} \leq -x - r_{cs} \text{ かつ } -r_{ii} < -x + r_{cs} \\ (f_o - f_i) / S & -x - r_{cs} < -r_{io} \text{ かつ } -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2) / S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

$|-x - (-r_{io})| > |-r_{ii} - (-x)|$ かつ $|-x - (-r_{io})| > |r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} \pi r_{cs}^2 / S & -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (\pi r_{cs}^2 - f_i) / S & -r_{ii} < -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (\pi r_{cs}^2 - \pi r_{ii}^2) / S & -r_{io} \leq -x - r_{cs} \text{ かつ } r_{ii} \leq -x + r_{cs} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2) / S & -x - r_{cs} < -r_{io} \text{ かつ } -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

$|-x - (-r_{io})| = |-r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} \pi r_{cs}^2 / S & -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (f_o - f_i) / S & -r_{ii} < -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2) / S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

$|-x - (-r_{io})| > |-r_{ii} - (-x)|$ かつ $|-x - (-r_{io})| = |r_{ii} - (-x)|$ のとき,

$$f_{cs} = \begin{cases} \pi r_{cs}^2 / S & -x + r_{cs} \leq -r_{ii} \\ (\pi r_{cs}^2 - f_i) / S & -r_{ii} < -x + r_{cs} < r_{ii} \\ (f_o - \pi r_{ii}^2) / S & r_{ii} \leq -x + r_{cs} < r_{io} \\ 1 & r_{io} \leq -x + r_{cs} \end{cases}$$

以上がキャリアセンス条件の計算式である。

3.3 キャリアセンス条件を付加した条件付きカバレッジ確率

キャリアセンス条件を付加した条件付きカバレッジ確率を以下に示す。

$$P_{cv|1}(R_M) = \int_{\Gamma'}^{\Gamma_{GW}} \int_{\Gamma_{R_M - 3\delta_x}}^{\Gamma_{GW}} \left(\Phi_c(\gamma, \gamma_{i1}) + \bar{\Phi}_c(\gamma, \gamma_{i1}) \cdot \Phi_{cs}(\gamma, \gamma_{i1}) \right) \cdot f_{\Gamma|D \in G}(\gamma) \cdot f_{\Gamma_{i1}|D_{i1} \in G}(\gamma_{i1}) d\gamma d\gamma_{i1} \quad (3.3)$$

ただし, $\Phi_{cs}(\gamma, \gamma_{i1})$ はキャリアセンス条件である。

第4章

数値実験

キャリアセンス条件を付加した新たな条件付きカバレッジ確率について数値実験を行った。その結果を図 4.1 に示す。また、各パラメータを表 4.1 に示す [12] [13]。キャリアセンスレベルを-100dBm,-90dBm,-80dBm と変えて実行した。従来の $P_{cv|1}(R_M)$ に比べて、どれもカバレッジ確率が向上した。ただし、キャリアセンスレベルが-80dBm のときは-100dBm に比べてカバレッジ確率はほとんど向上しない結果となった。図 4.1 からわかるように、通信エリアの半径が大きくなるにつれてカバレッジ確率は低下し、キャリアセンス機能を持たない従来の $P_{cv|1}(R_M)$ に近づいている。これは、通信エリアの拡大に伴い ED 間の距離が遠くなり、キャリアセンスが届かなくなったためと考えられる。

表 4.1 実験諸元

| | |
|-------------------|------------------|
| 拡散率 | 7 |
| 送信電力 | 14dBm |
| シャドウイングパラメータの標準偏差 | 4.29 dB |
| 最大カバレッジ距離 | 1.04 km |
| 経路損失指数 (ED-GW) | 2.32 |
| 経路損失指数 (ED-ED) | 3.3 |
| 帯域幅 | 200kHz |
| キャリアセンスレベル | -100,-90,-80 dBm |

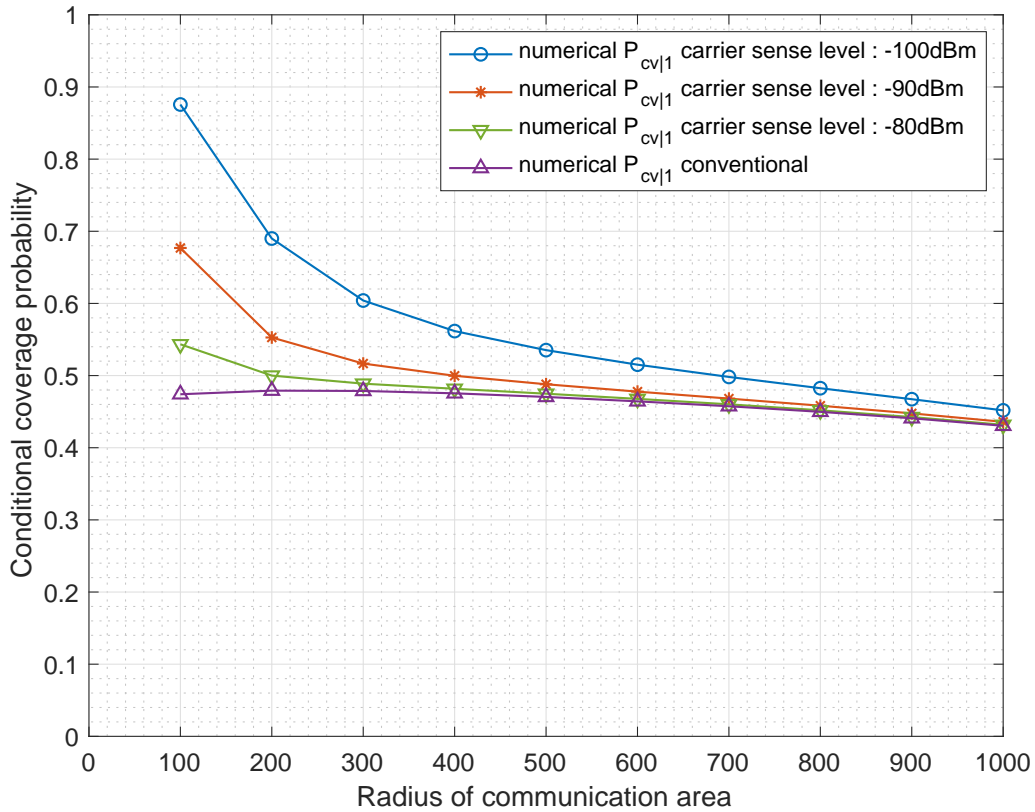


図 4.1 新たに導出した $P_{cv|1}$ の数値実験結果

カバレッジ確率の下限值は以下のように定義されている [14].

$$P_{cv}^{(LB)} = P_{cv|0}(R_M) \cdot P_{cl|0}(R_M) + P_{cv|1}(R_M) \cdot P_{cl|1}(R_M) \quad (4.1)$$

また、パケット生起確率 $P_{cl|0}(R_M)$, $P_{cl|1}(R_M)$ はネットワーク負荷 L を用いて以下で表される。

$$\begin{aligned} P_{cl|0}(R_M) &= \exp(-2L) \\ P_{cl|1}(R_M) &= 2L \exp(-2L) \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$L = \frac{\lambda \cdot N_{ed} \cdot MT_s}{N_{ch}} \quad (4.3)$$

ただし、 λ , N_{ed} , M , T_s , N_{ch} はパケット生起率、ED 数、1 パケット当たりのシンボル数、1 シンボルの送信時間、チャンネル数である。図 4.2 にカバレッジの要求値 CPR が 0.9 を満たすときの ED 数下限値を示す。従来のキャリアセンス機能なしに比べて ED 数下限値は向上する結果が得られた。

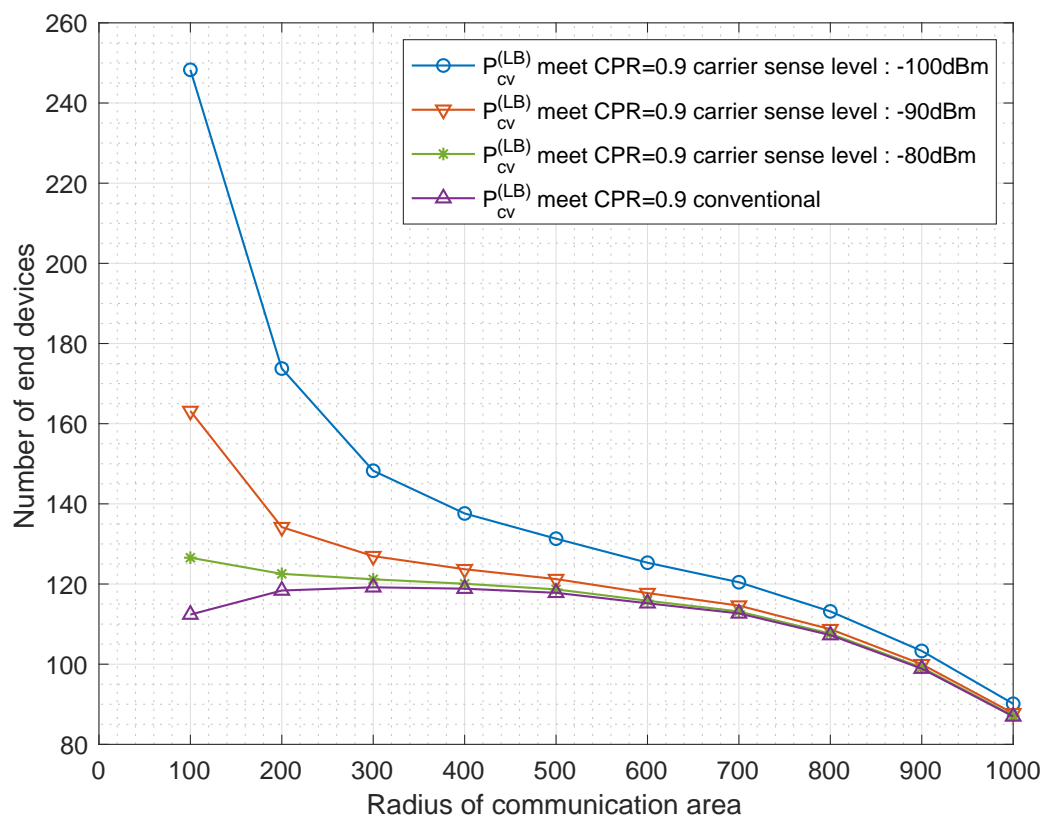


图 4.2 ED 数下限值

第 5 章

おわりに

単一の干渉信号が存在する LPWAN システムにおいて、新たにキャリアセンス機能を付加した条件付きカバレッジ確率を導出した。そして数値実験を行い、カバレッジ確率がキャリアセンスを持たないときと比べて向上する結果が得られた。また、この結果をもとに収容 ED 数下限値を導出した。ED 数下限値はキャリアセンスを持たないときと比べて向上する結果が得られた。

本研究に関連する研究業績

1. 川島朋幸, 隈元大輔, 成枝秀介, 藤井威生, 成瀬央, “ピーク検出に基づくキャリアセンスを用いた LPWAN のカバレージ確率の下限值,” 信学技報, vol.123, no.369, SR2023-86, pp.78-85, 2024 年 1 月.
2. Natsuki Miyoshi, Tomoyuki Kawashima, Shusuke Narieda, Takeo Fujii and Hiroshi Naruse, ”Measurement of sub-GHz Band LPWA Propagation at Half-Wavelength Intervals,” in Proc. IEEE Future Networks World Forum 2022, pp.429-433, 2022 年 10 月.
3. 成枝秀介, 三好夏生, 川島朋幸, 藤井威生, 成瀬央, ”sub-GHz 帯 LPWA 電波伝搬測定結果の周波数解析,” 電子情報通信学会技術報告, vol.121, no.345, SR2021-76, pp.90-92, 2022 年 1 月.
4. 川島朋幸, 成枝秀介, 藤井威生, 梅林健太, 成瀬央, ”LOS/NLOS 環境における半波長間隔での 920MHz 帯 LPWA 電波伝搬測定結果,” 電子情報通信学会技術報告, vol.120, no.404, RCS2020-236, pp.161-162, 2021 年 3 月.

謝辞

本研究の遂行にあたり指導教員である三重大学大学院工学研究科 成枝秀介准教授に深く感謝申し上げます。本研究は総務省戦略的情報通信研究開発推進事業 SCOPE (#JP215006001) により行われました。貴重なご助言を賜りました三重大学大学院工学研究科 成瀬央教授，真鍋哲也教授に深く感謝申し上げます。先輩や同期，後輩の方々にもお世話になりました。隈元大輔先輩には貴重なご助言や指導を頂き感謝致します。また，研究生生活を通して支えてくれた石原良規君，そして松田朋晃君ら後輩の方々に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, “Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 23, no. 5, pp. 60–67, Oct. 2016.
- [2] <https://www.birdz.com>
- [3] 総務省 [2017] 『IoT 化する情報通信産業』, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h29/pdf/n3300000.pdf>
- [4] H. Andre et al., “LPWAN Communication in IoT Network for Electrical Energy Monitoring,” 2022 International Symposium on Information Technology and Digital Innovation (ISITDI), Padang, Indonesia, 2022, pp. 32-35, doi: 10.1109/ISITDI55734.2022.9944470.
- [5] LoRa Alliance, <https://lora-alliance.org/>
- [6] SIGFOX, <https://www.sigfox.com/>
- [7] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. M. Townsley, “A study of Lora: long range and low power networks for the internet of things,” *Sensors*, vol. 16, no. 9, pp. 1466–1518, 2016.
- [8] ARIB STD-T108, V. 1. 2, Assoc. Radio Ind. Bus., Tokyo, Japan, Jan. 2018.
- [9] T. Elshabrawy, J. Robert, “Capacity Planning of LoRa Networks With Joint Noise-Limited and Interference-Limited Coverage Considerations,” *IEEE Sensors J.*, vol. 19, no. 11, Jun. 1, 2019.
- [10] 隈元大輔, 成枝秀介, 藤井威生, 成瀬央, “複数干渉波環境を想定した LPWAN の収容可能端末数下限値の導出,” *信学技報*, vol.122, no.243, SR2022-47, pp.15-19, 2022年 11 月
- [11] A. Papoulis, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, 4th ed. McGraw-Hill, 2002.

- [12] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen, and M. Pet tissalo, "On the coverage of lpwans: Range evaluation and channel attenuation model for lora technology," in Proc. 14th Int. Conf. ITS Telecommun. (ITST), Dec. 2015.
- [13] 土屋弘昌, 宮下充史, "スマートメータ用電波伝搬エリア設計支援ツールの開発", 電中研報告, R13014, 2014 年 6 月
- [14] A. Leon-Garcia and I. Widjaja, "Communication Networks: Fundamental Concepts and Key Architectures," 2nd ed. New York, NY, USA: McGrawHill, 2004