

周波数選択性フェージング通信路 におけるPolar符号化OFDMの 低演算設計手法に関する検討

On Low-Complexity Construction of
Polar-Coded OFDM System
Over Frequency-Selective Fading Channels

横浜国立大学

倉谷 悠希 ・ 落合 秀樹

WBS2022 12/13

訂正

【誤】

[2] Y. Liu, H.-H. Chen, and L. Wang, "Physical Layer Security for Next Generation Wireless Networks: Theories, Technologies, and Challenges," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 347–376, 2017, doi: 10.1109/COMST.2016.2598968.

[7] H. Ochiai, P. Mitran, and H. V. Poor, "Capacity-approaching polar codes with long codewords and successive cancellation decoding based on improved Gaussian approximation," vol. 69, no. 1, Jan. 2021.

【正】

[2] S. Liu, Y. Hong, and E. Viterbo, "Polar Codes for Block Fading Channels," in *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, San Francisco, CA, USA, Mar. 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/WCNCW.2017.7919041.

[7] H. Ochiai, P. Mitran and H. Vincent Poor, "Capacity-Approaching Polar Codes With Long Codewords and Successive Cancellation Decoding Based on Improved Gaussian Approximation," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 1, pp. 31-43, Jan. 2021, doi: 10.1109/TCOMM.2020.3030057.

発表の構成

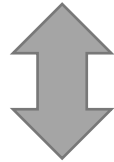
- 背景と目的
- 関連研究
- 提案手法
- シミュレーション結果
- まとめ

背景と目的

- OFDM変調

近年の無線通信で主流の**変調方式**

- 周波数選択性フェージングへの耐性
- 高い周波数利用効率



- Polar符号

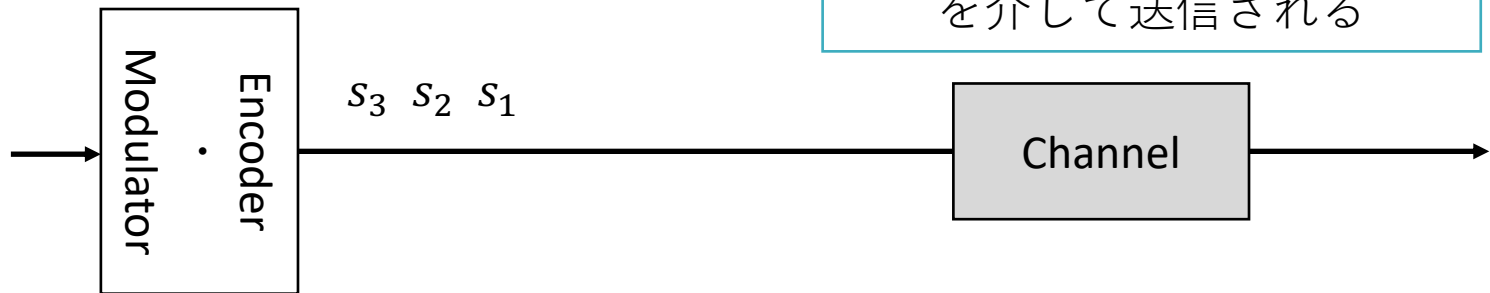
これらを組み合わせたシステムが想定される

Turbo・LDPCに匹敵する**誤り訂正符号**

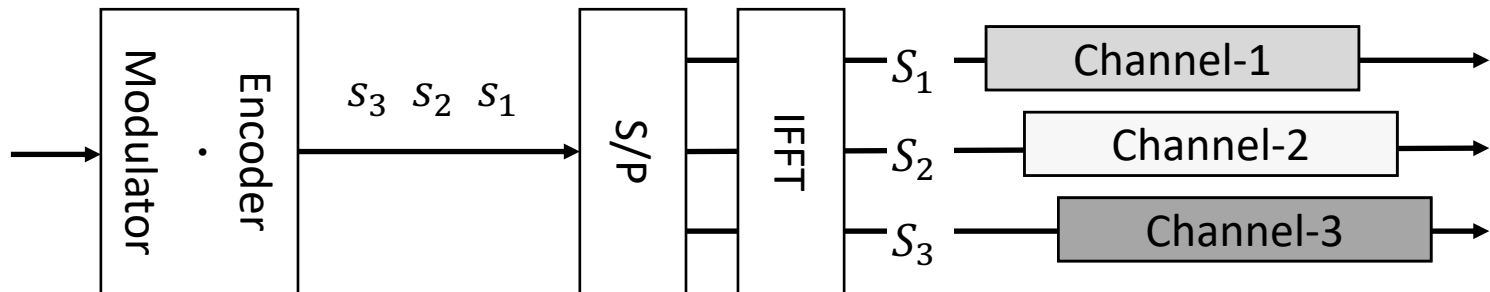
- SC復号による低い計算複雑度
- SCL・CASCL復号による高い誤り訂正能力

OFDM変調

- シングルキャリア伝送



- OFDM変調 (マルチキャリア伝送)



Polar符号

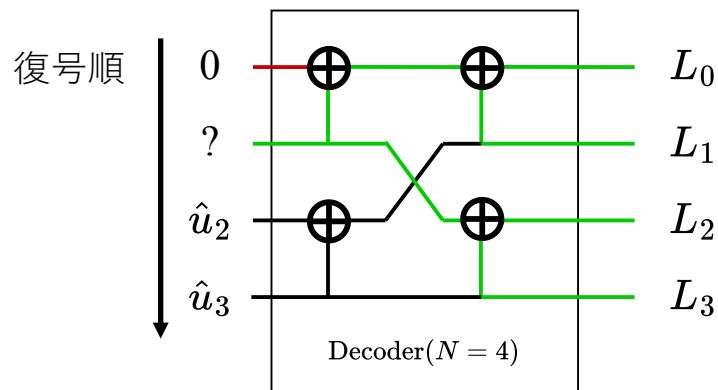
- 比較的新しい誤り訂正符号^[1]

[1] E. Arıkan, "Channel Polarization: A Method for Constructing Capacity-Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 55, no. 7, pp. 3051–3073, Jul. 2009, doi: 10.1109/TIT.2009.2021379.

- Successive Cancellation復号(SC復号)

最も一般的な復号法 ($N \rightarrow \infty$ で通信路容量達成可能)

- 計算複雑度 $O(N \log N)$
- 更に訂正能力の高い SCL復号・CA-SCL復号がある



Turbo・LDPC符号
に匹敵

Polar符号

- 通信路分極

通信路 W の結合および分解 $(W, W) \mapsto (W_2^{(0)}, W_2^{(1)})$
により非対称性が生じる

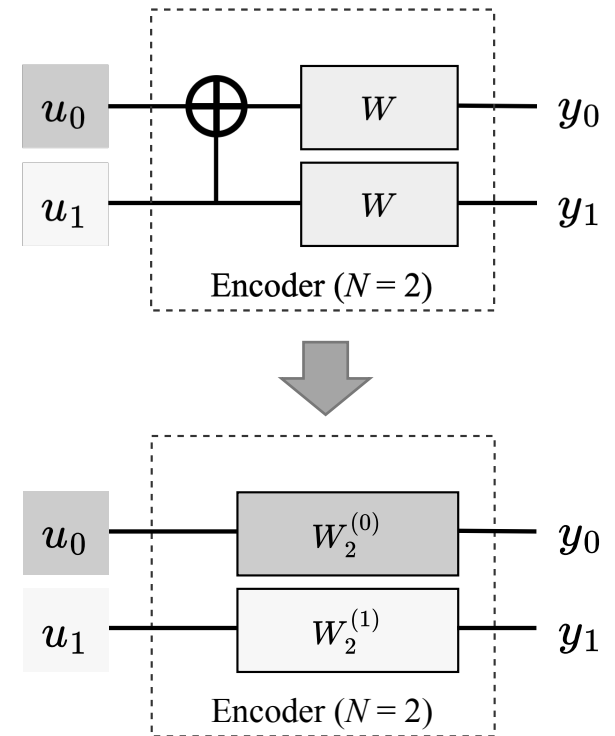
- 遷移確率

$$W_2^{(0)}(y_0, y_1 | u_0) = \frac{1}{2} \sum_{u_1 \in \mathcal{X}} W(y_0 | u_0 \oplus u_1) W(y_1 | u_1)$$

$$W_2^{(1)}(y_0, y_1 | u_0) = \frac{1}{2} W(y_0 | u_0 \oplus u_1) W(y_1 | u_1)$$

- 相互情報量

$$I(W_2^{(0)}) \leq I(W_2^{(1)})$$



Polar符号

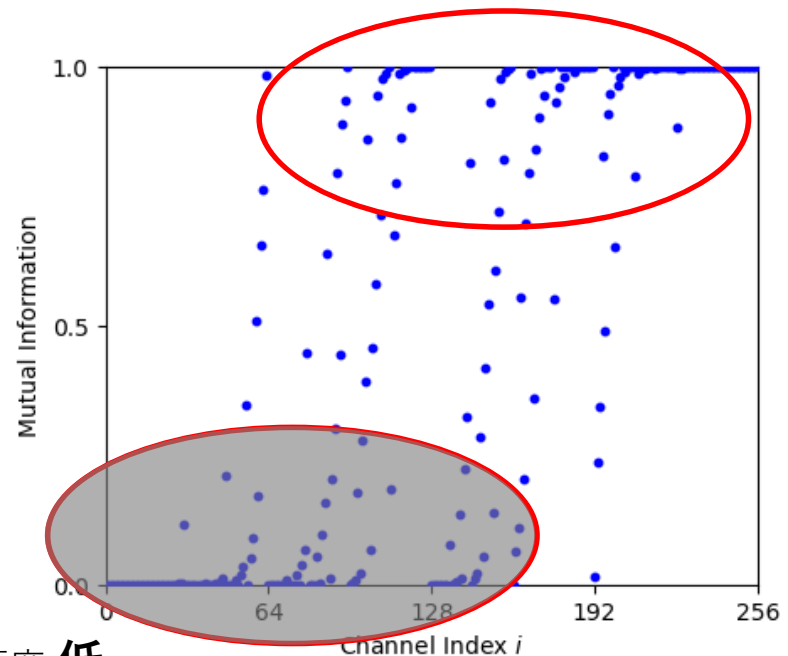
- 通信路分極

通信路 W の結合および分解 $(W, W) \mapsto (W_2^{(0)}, W_2^{(1)})$
により非対称性が生じる

信頼度 高

雑音の集中するビットの値を
事前決定 (凍結ビット) とする
ことで冗長性をもたせる

Polar符号の性能は設計に依存



信頼度 低

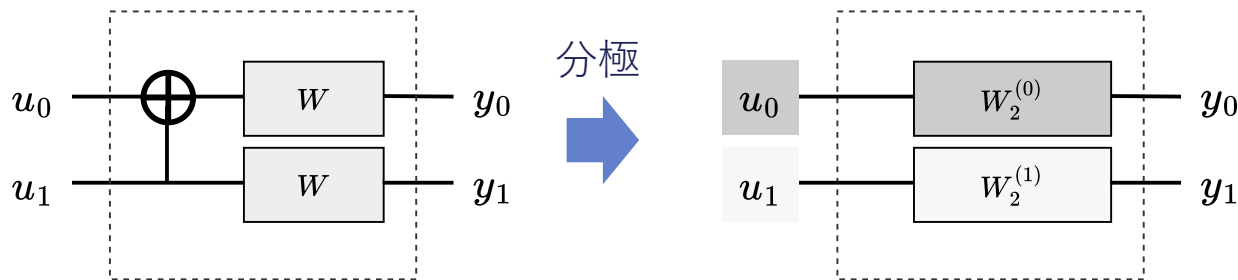
符号長 $N = 256$ の各ビットチャネル
の相互情報量

Polar符号化OFDMシステム

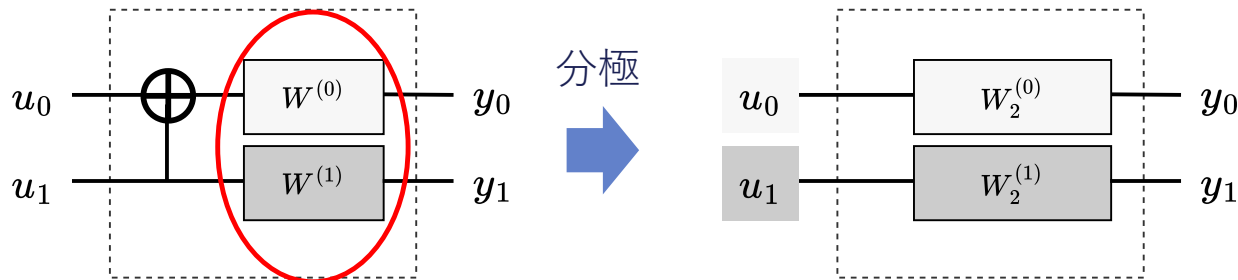
- 周波数選択性フェージングを受ける場合を想定
各OFDMサブキャリアは信号の
受信強度にばらつきが生じる

OFDM変調を行った際のPolar符号は
通信路分極の推移が異なる

[AWGN]



[Fading]



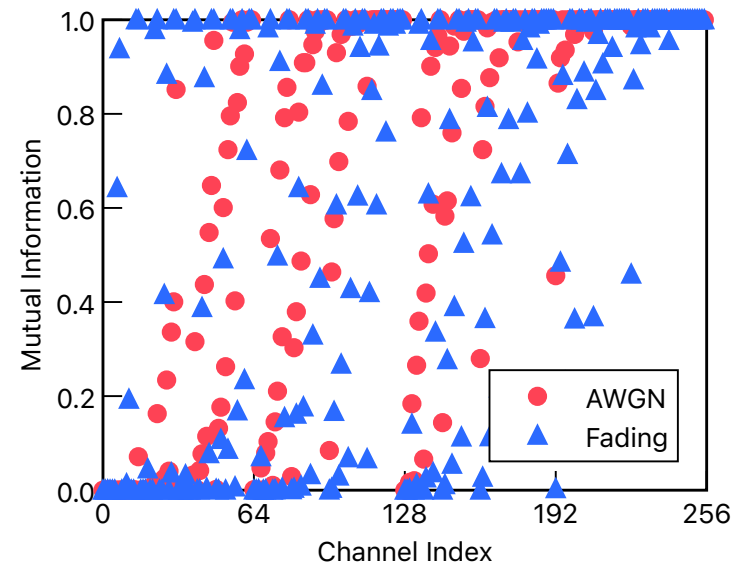
Polar符号化OFDMシステム

- 周波数選択性フェージングを受ける場合を想定
各OFDMサブキャリアは信号の
受信強度にばらつきが生じる

OFDM変調を行った際のPolar符号は
通信路分極の推移が異なる



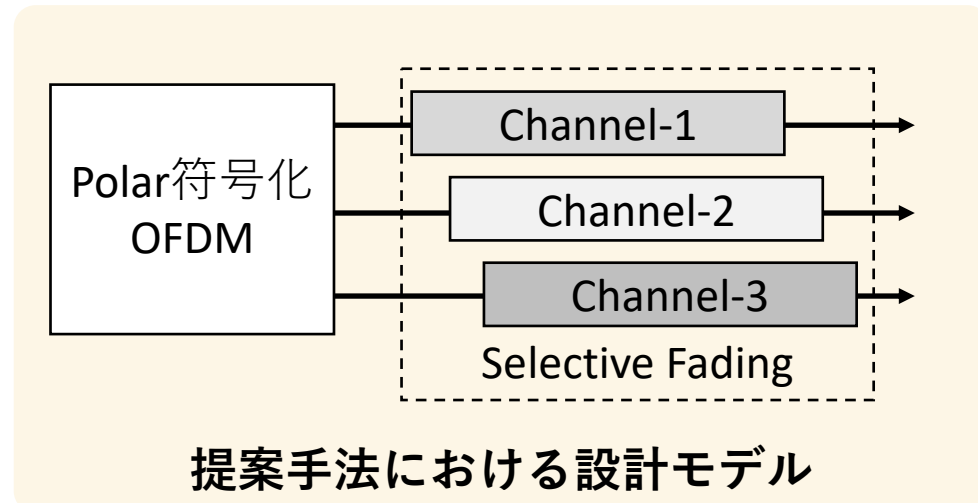
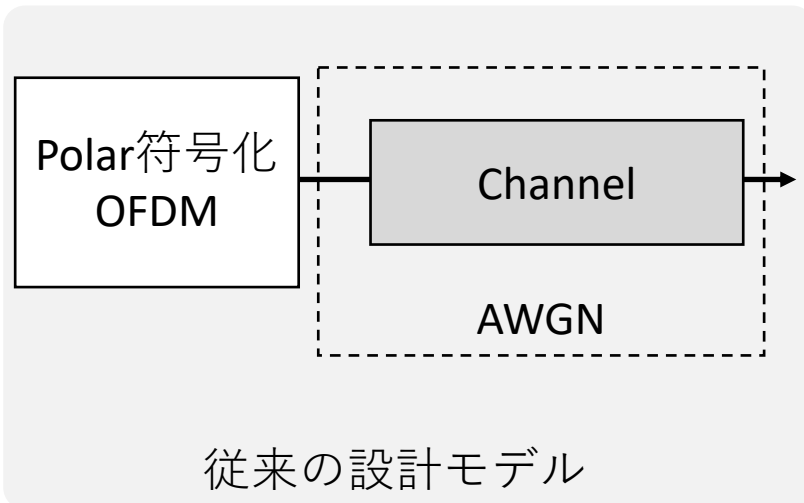
AWGNを想定した場合と
凍結すべきビットが異なる



シミュレーションによる誤り率に基づく
各ビットの相互情報量

本研究の目的

- 周波数選択性フェージング通信路に適合設計を行うことで性能を向上させる



従来設計モデルとの性能比較 および ビットインターリーバの検討 を行う

関連研究

- Polar符号の設計 (BEC/AWGN)
 - モンテカルロ法, Bataccharryaパラメータ

[1] E. Arikan, “**Channel Polarization: A Method for Constructing Capacity-Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels,**” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 55, no. 7, pp. 3051–3073, Jul. 2009, doi: 10.1109/TIT.2009.2021379.

- 密度発展法 (DE) → 高精度・高コスト

[5] R. Mori and T. Tanaka, “**Performance and construction of polar codes on symmetric binary-input memoryless channels,**” in *2009 IEEE International Symposium on Information Theory*, Jun. 2009, pp. 1496–1500. doi: 10.1109/ISIT.2009.5205857.

- ガウス近似法 (GA) → 低コスト

[6] P. Trifonov, “**Efficient Design and Decoding of Polar Codes,**” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 60, no. 11, pp. 3221–3227, Nov. 2012, doi: 10.1109/TCOMM.2012.081512.110872.

[7] H. Ochiai, P. Mitran and H. Vincent Poor, “**Capacity-Approaching Polar Codes With Long Codewords and Successive Cancellation Decoding Based on Improved Gaussian Approximation,**” in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 1, pp. 31-43, Jan. 2021, doi: 10.1109/TCOMM.2020.3030057.

関連研究

- フェージング通信路におけるPolar符号の設計

[2] S. Liu, Y. Hong, and E. Viterbo, "Polar Codes for Block Fading Channels," in *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, San Francisco, CA, USA, Mar. 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/WCNCW.2017.7919041.

- Polar-OFDMシステムの評価

[3] M. Oda and T. Saba, "Polar Coding with Enhanced Channel Polarization under Frequency Selective Fading Channels," *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICC.2018.8422465.

フェージング通信路に対するアプローチ

- AWGN or BECを想定した事前凍結ビット+ビットインターリーバ
- GAによるPolar符号の設計 (フェージング通信路上)
- サブキャリアの受信電力に基づくビットインターリーバ



OFDM + Polar符号 の設計の検討や
インターリーバの検討は十分に行われてない

発表の構成

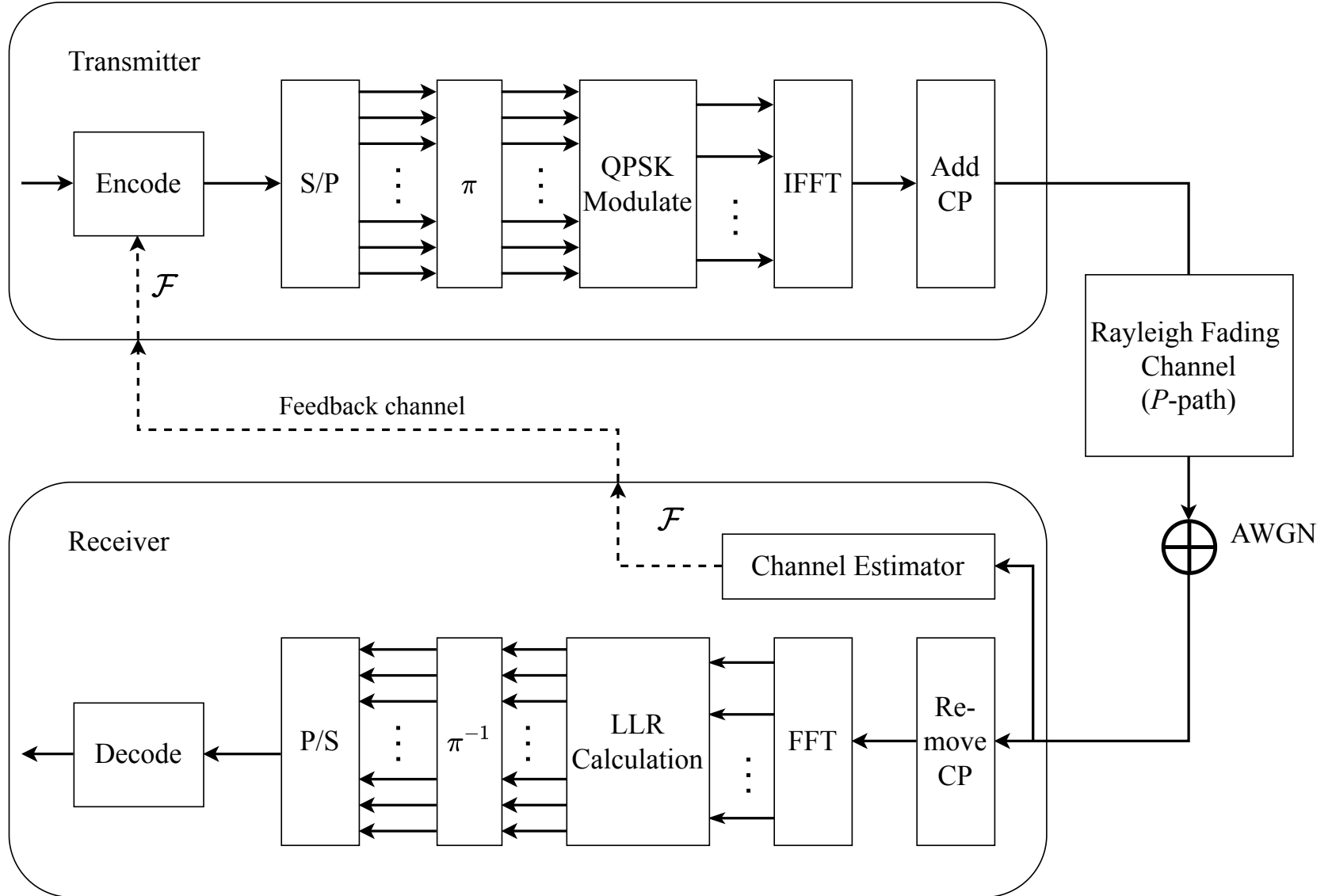
- 背景と目的
- 関連研究
- 提案手法
- シミュレーション結果
- まとめ

提案手法

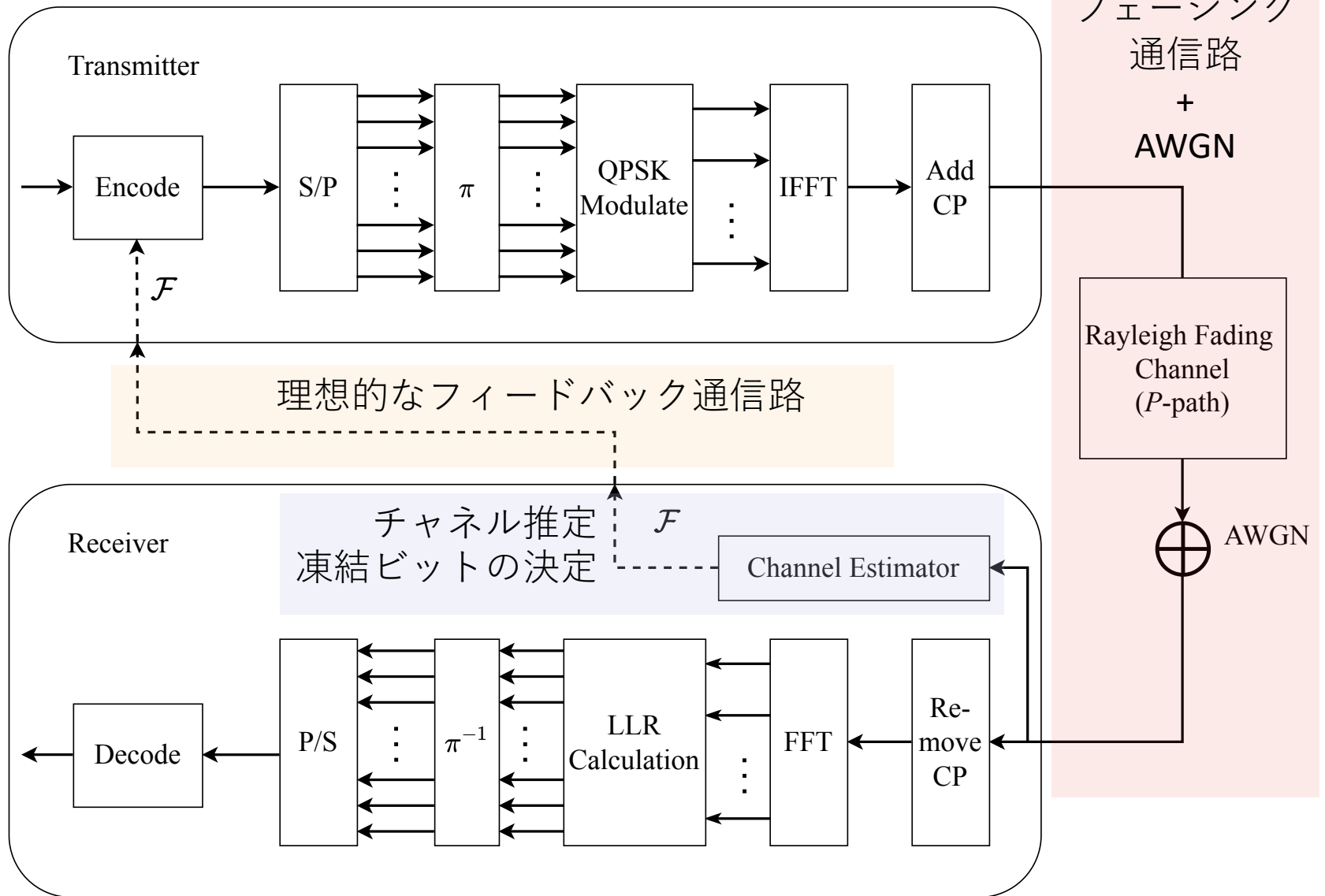
フェージング通信路における Polar符号化OFDMシステムの設計

- 低演算量設計手法に注目
 - RCAにより精度と低演算量を両立
- 受信機側でチャンネル推定・凍結ビット決定
 - 送信機側でチャンネル状態情報(CSI)が不要
- ビットインターリーバの比較
 - Polar-OFDMシステムに最適な組み合わせを検討

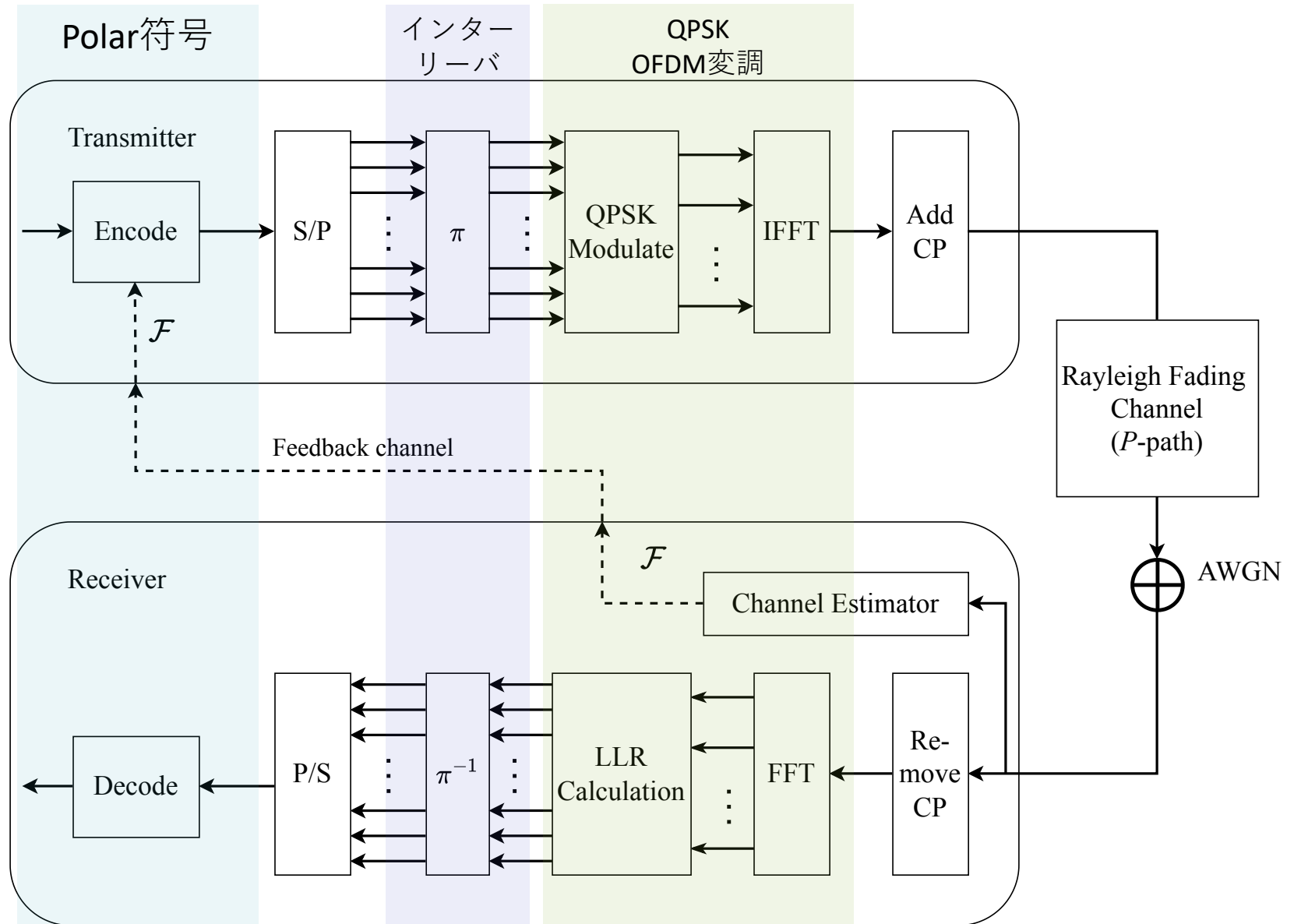
システムモデル



システムモデル



システムモデル



Polar符号の設計手法

- Reciprocal Channel Approximation (RCA)

相互情報量の二元性に基づきSignal-to-Noise Ratio(SNR) を計算
GAと同程度の低演算量 $O(N \log N)$ かつ高精度な推定が可能

アンダーフローを起こさない

低演算量でビットチャネル推定が可能な**RCA**により、
時変的なチャネルに対しても適合設計が可能

[9] S.-Y. Chung, "On the construction of some capacity-approaching coding schemes," *Ph.D. dissertation, MIT, 2000*.

[7] H. Ochiari, P. Mitran and H. Vincent Poor, "**Capacity-Approaching Polar Codes With Long Codewords and Successive Cancellation Decoding Based on Improved Gaussian Approximation**," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 1, pp. 31-43, Jan. 2021, doi: 10.1109/TCOMM.2020.3030057.

Polar符号の設計手法

- Reciprocal Channel Approximation (RCA)

相互情報量の二元性に基づきSignal-to-Noise Ratio(SNR) を計算
GAと同程度の低演算量 $O(N \log N)$ かつ高精度な推定が可能

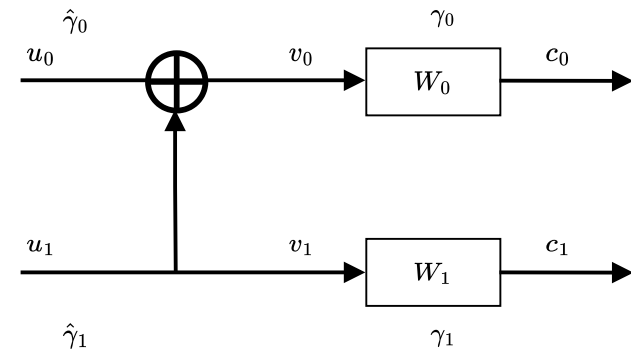
アンダーフローを起こさない

低演算量でビットチャネル推定が可能な**RCA**により、
時変的なチャネルに対しても適合設計が可能

$$\hat{\gamma}_1 = \gamma_0 + \gamma_1$$

$$\hat{\gamma}_0 = \Psi^{-1}(\Psi(\gamma_0) + \Psi(\gamma_1))$$

$\Psi(\cdot)$: Reciprocal channel mapping function



RCAによるSNRの近似計算

発表の構成

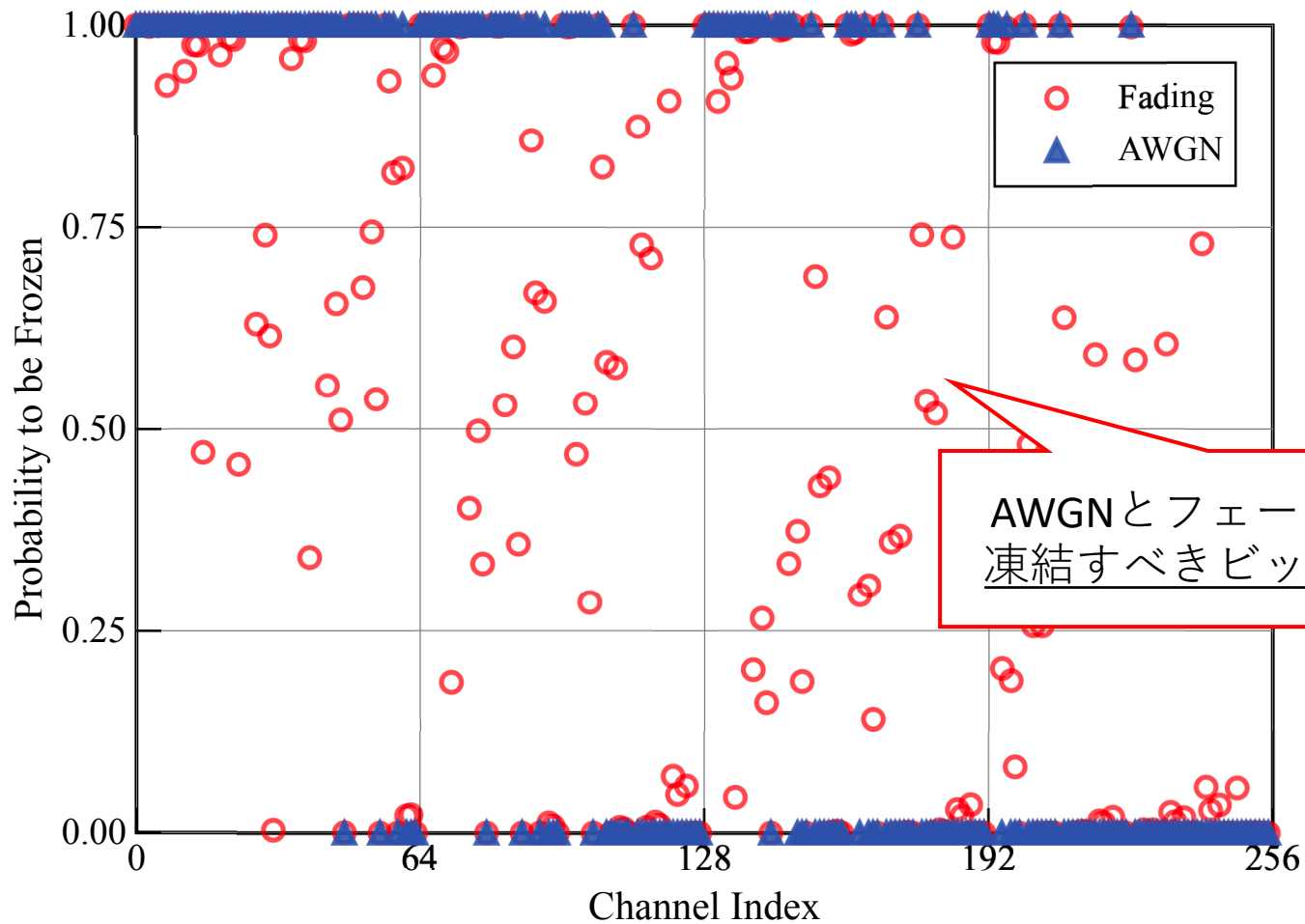
- 背景と目的
- 関連研究
- 提案手法
- シミュレーション結果
- まとめ

提案手法の評価

- シミュレーションによるブロック誤り率(BLER)の測定
- フェージング通信路の係数実現値のデータセットを2000通り用意
各方式で共通のデータセットを利用
- シミュレーション諸元は以下

シミュレーション諸元	
符号化方式	Polar符号
符号長	$N = 256$
符号化率	$R = 0.5$
1次変調	QPSK
OFDMサブキャリア数	128
復号	SC, SCL

フェージングが凍結ビット選択に及ぼす影響



各ビットが凍結ビットとして選択される確率

シミュレーション(1)

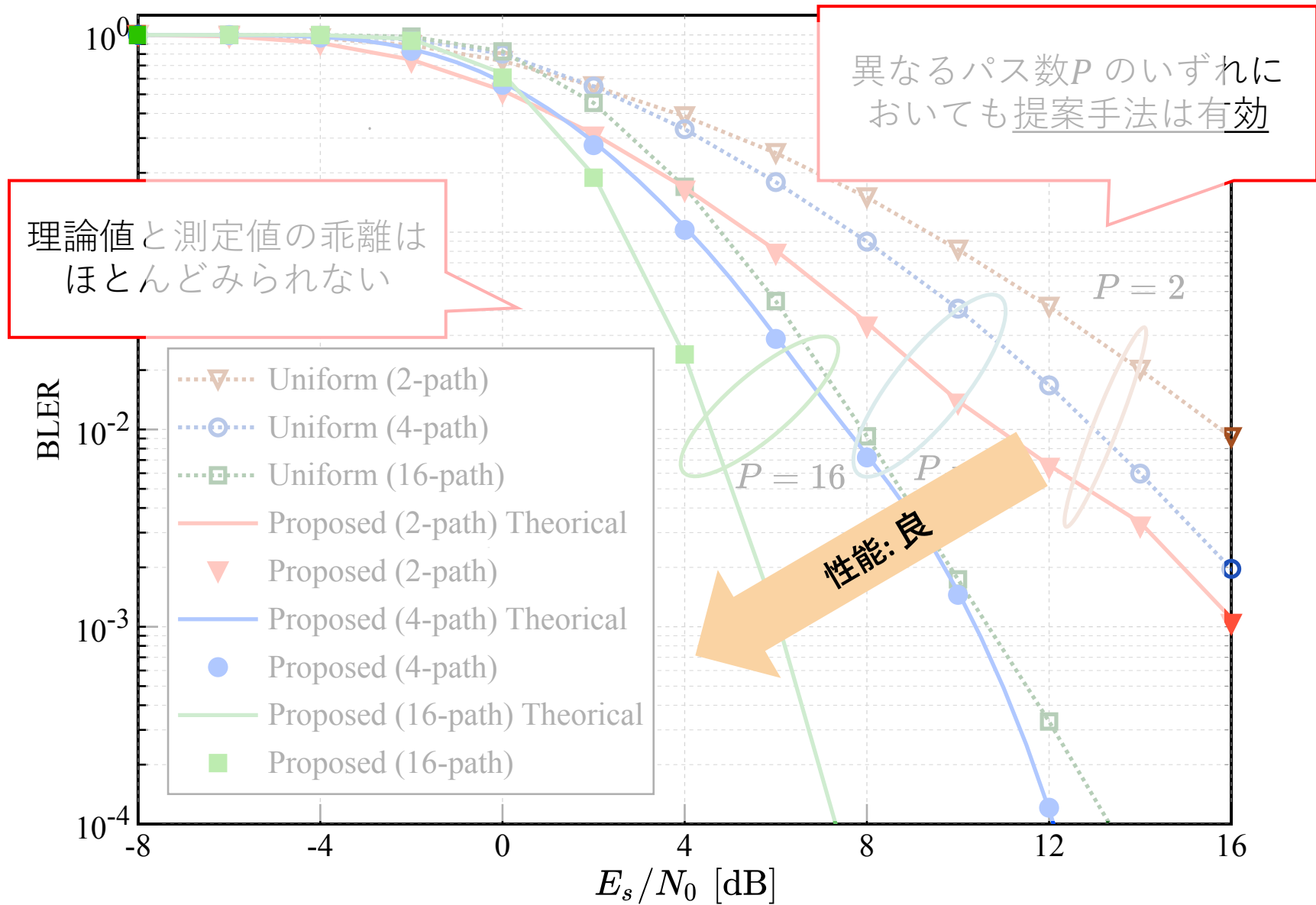
- フェージングのパス数 P を $P = 2, 4, 16$ と変化させた

それぞれ

- 従来手法として AWGN通信路 (Uniform SNR) を想定した設計
- 提案手法として フェージング通信路におけるPolar-OFDMの設計を比較

提案手法について,

- SNR推定に基づくBLERの理論値を実線でプロット
- シミュレーションによる測定値を点でプロット



シミュレーション(2)

以降ではパス数 $P = 4$ とする

- AWGN通信路 (Uniform SNR) を想定した設計
- フェージング通信路におけるPolar-OFDMの設計
を比較

AWGN想定 of 設計は

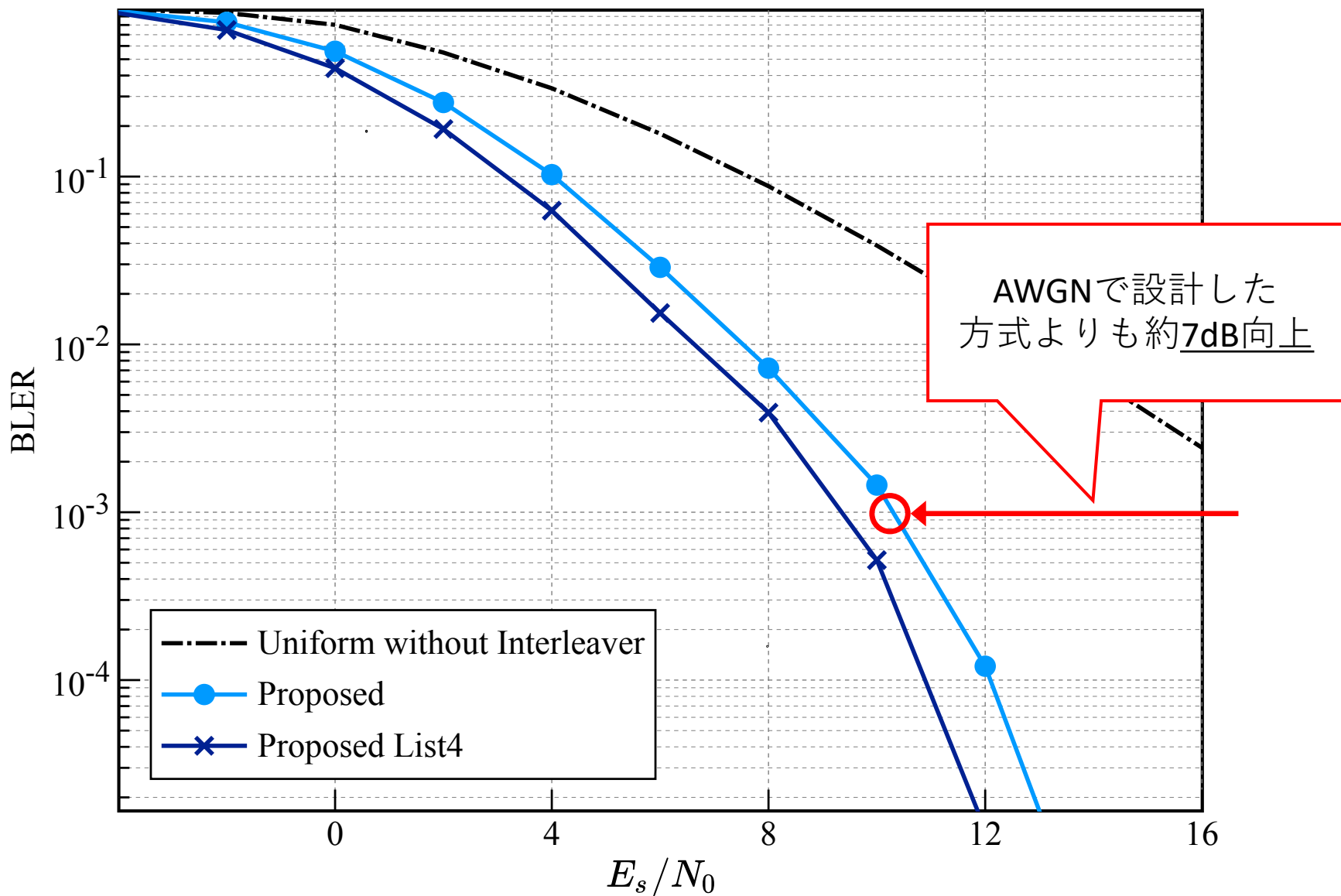
- インターリーバなし
- ランダムインターリーバ
- ブロックインターリーバ(16×16)

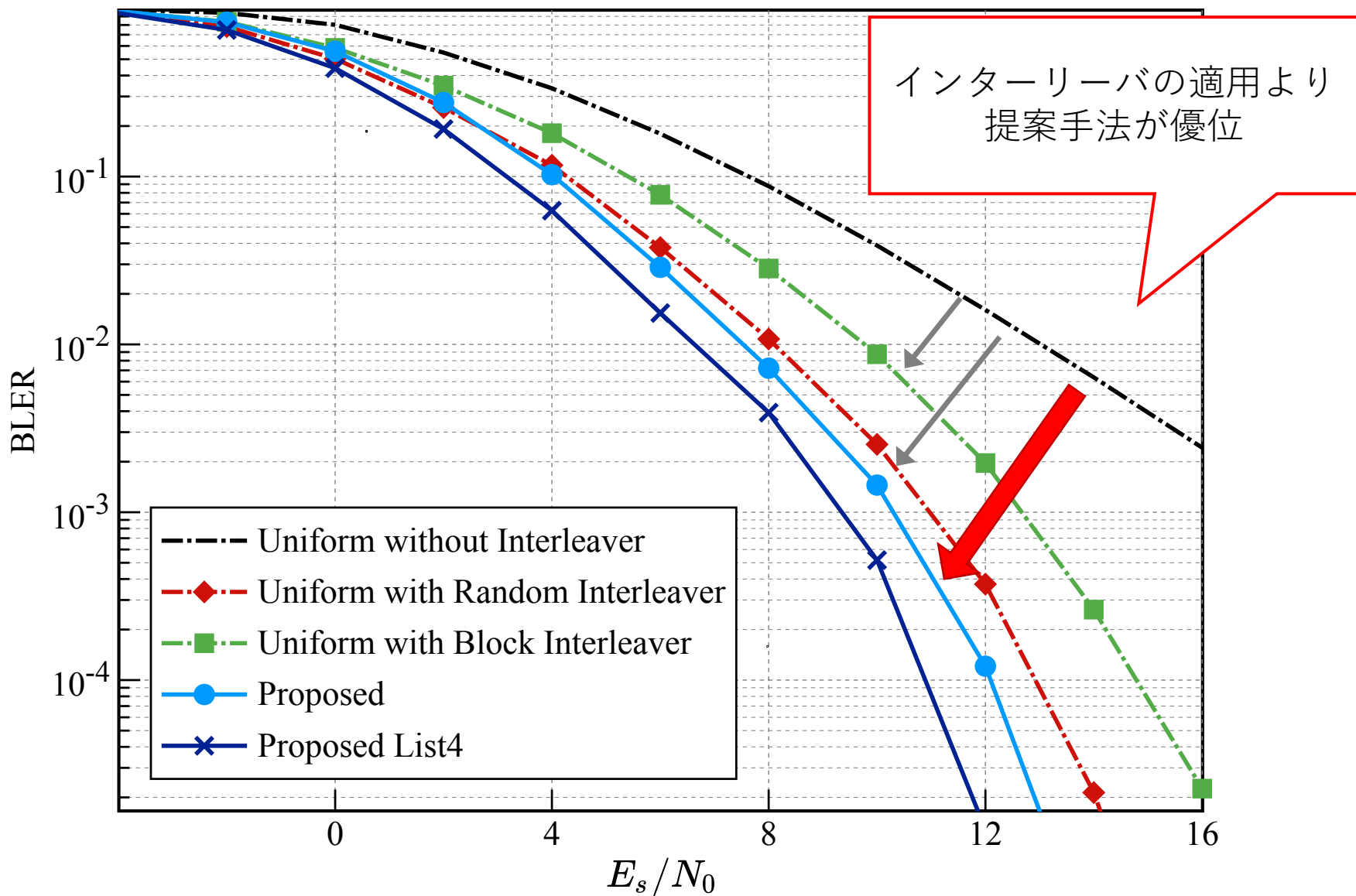
の3種

提案手法は

- SC復号
- SCL復号 (リスト数 $L = 4$)

の2種





シミュレーション(3)

- 提案設計手法にビットインターリーバを適用

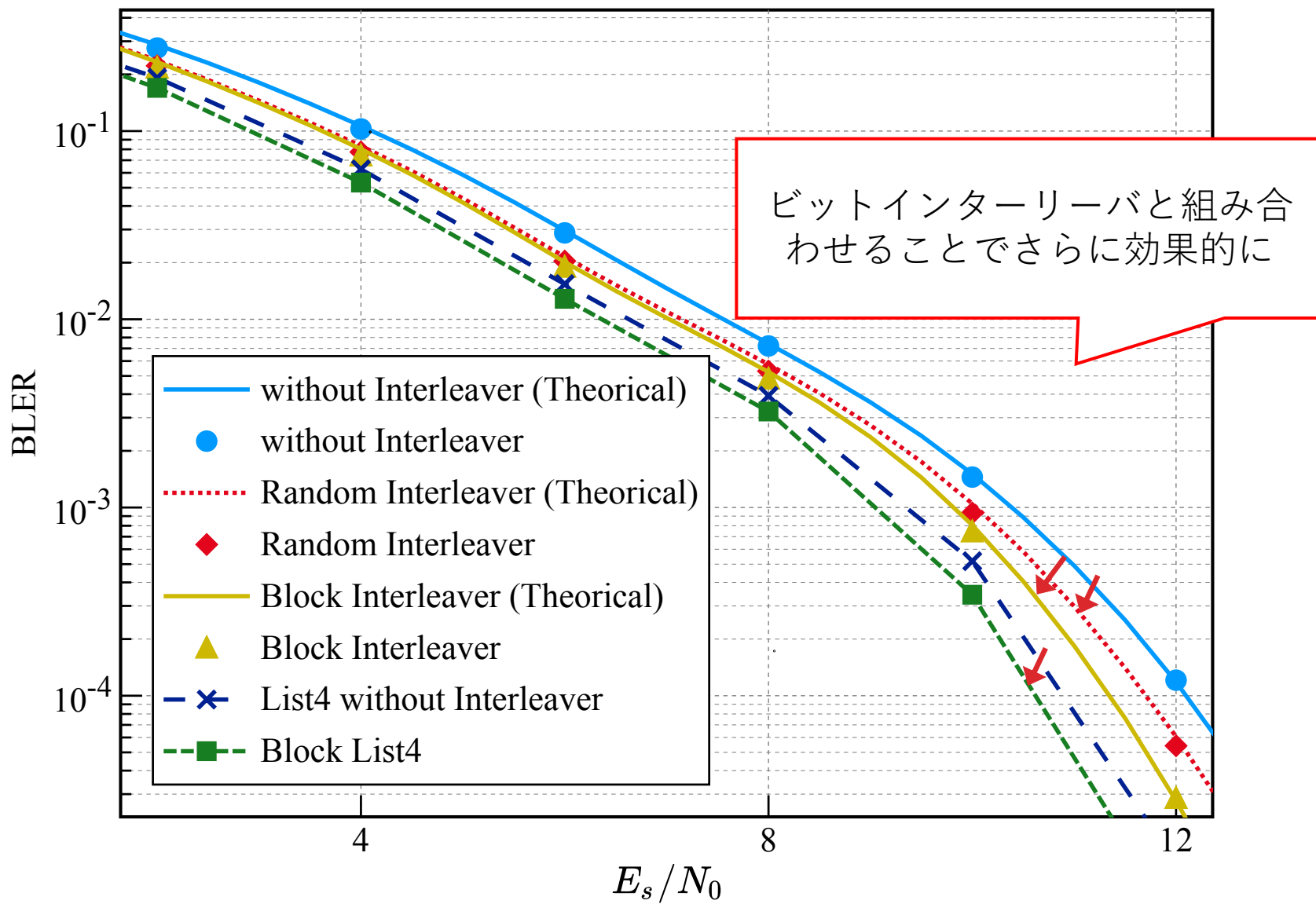
ビットインターリーバは

- ランダムインターリーバ
- ブロックインターリーバ (16×16)

を適用

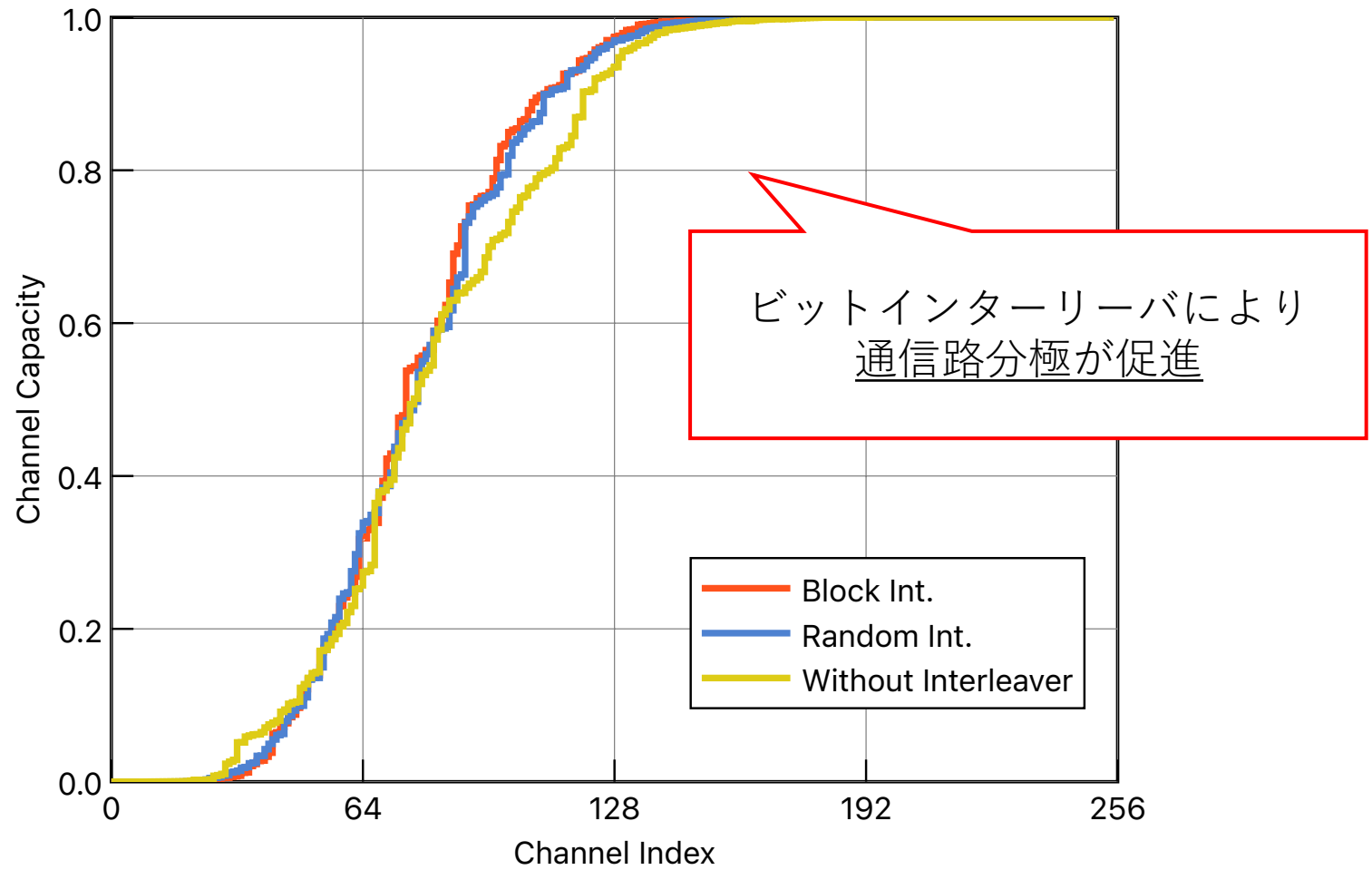
理論値の評価として

- 理論値を実線および点線でプロット (SCL復号を除く)
- シミュレーションによる測定値を点でプロット



インターリーバによる各ビットチャネルの通信路容量の変化

*急峻であるほどPolar符号としての性能**高**



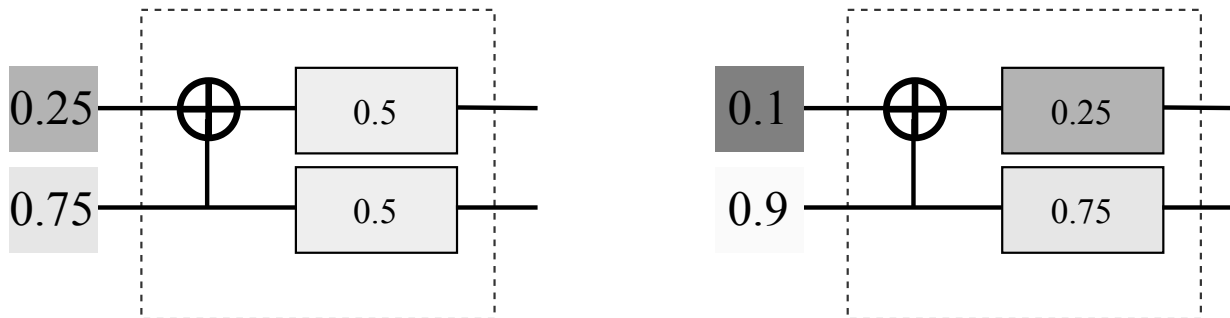
シミュレーション(4)

- 提案設計手法にサブキャリアの受信電力を考慮したビットインターリーバを適用

ただし受信電力の順位決定のソートで $O(M\log N)$ 必要

Interleaver A, B:

ゲインの差が小さいor大きいチャンネルを隣接させることで分極を促進する



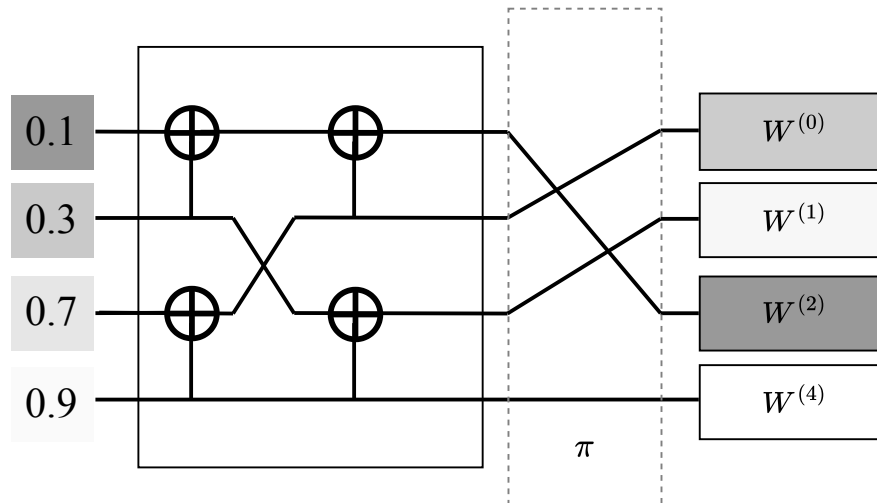
シミュレーション(4)

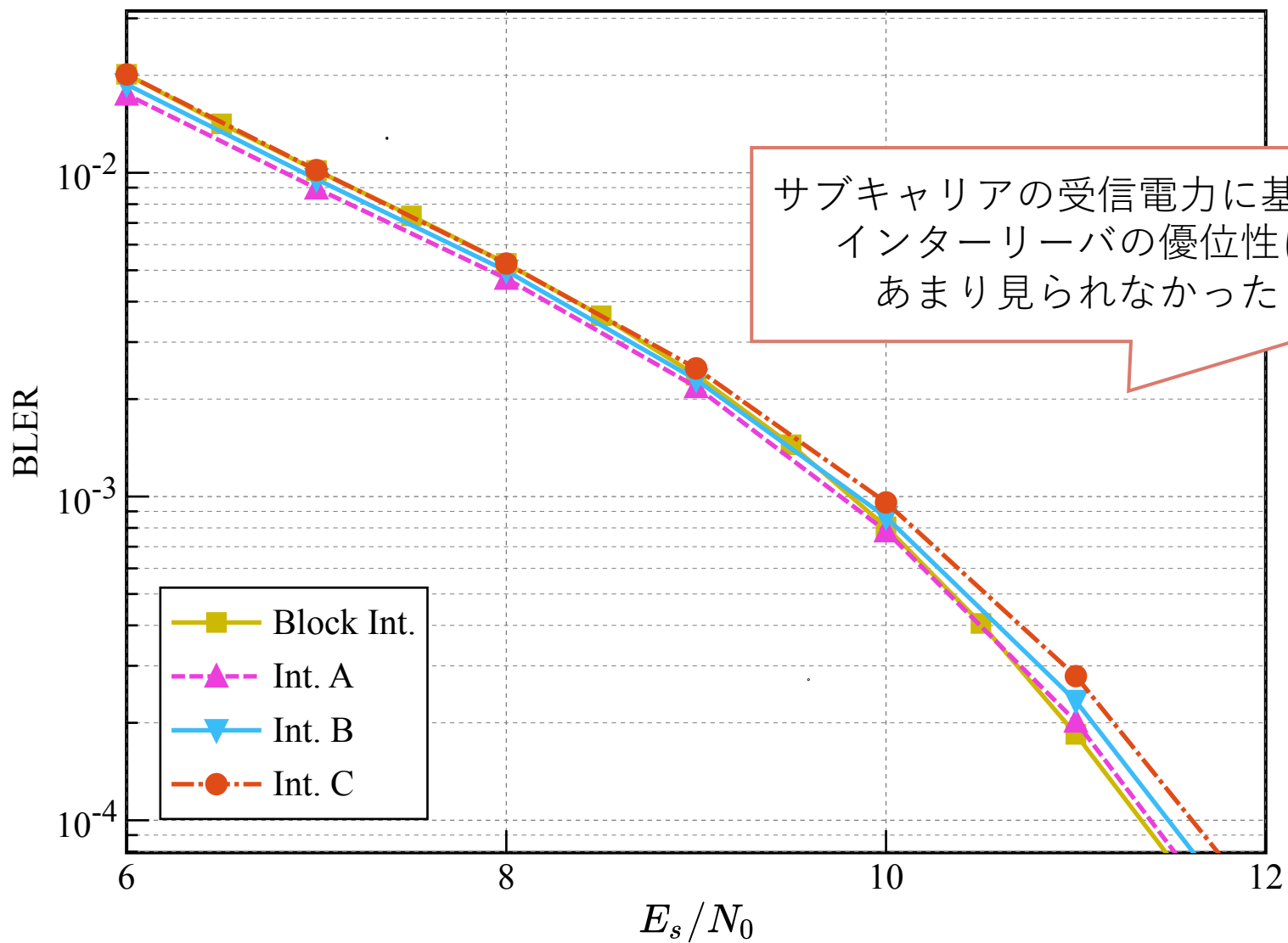
- 提案設計手法にサブキャリアの受信電力を考慮したビットインターリーバを適用

ただし受信電力の順位決定のソートで $O(N \log N)$ 必要

Interleaver C:

ビットチャネルの信頼度とサブキャリアの信頼度をマッチングすることにより分極を促進する





まとめ

周波数選択性フェージング通信路における

Polar符号化OFDMシステム的设计手法

を検討

提案手法により

- 低演算量かつ高精度なPolar符号の設計の実現
- BLER特性の大幅な改善
- インターリーバと組み合わせることによる性能向上

今後の課題

- 適応設計によるスループット改善の評価
- 適応変調符号化方式の検討

ご清聴ありがとうございました。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金
(課題番号21H04873) により行われた。