

SMAフィードスルー電極とビームとの電磁結合のモード解析

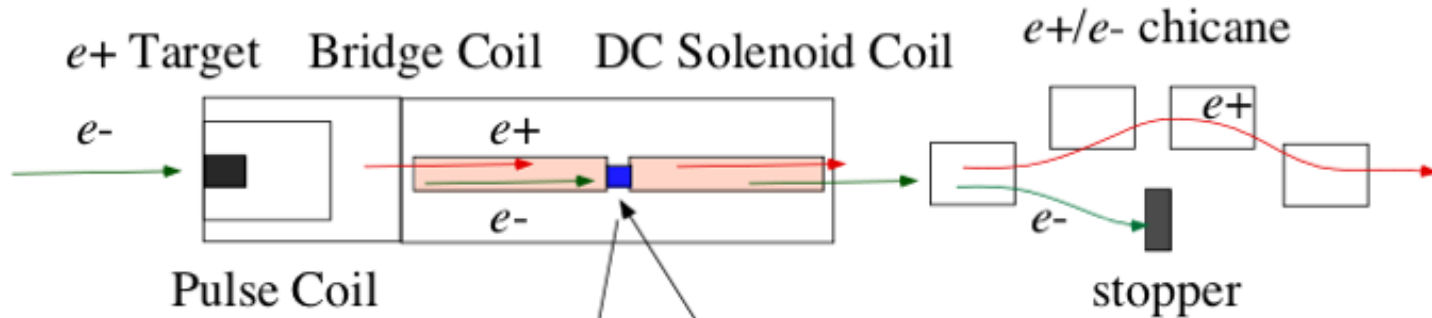
Accelerator Laboratory, KEK,
Tsuyoshi Suwada (*tsuyoshi.suwada@kek.jp*)

はじめに

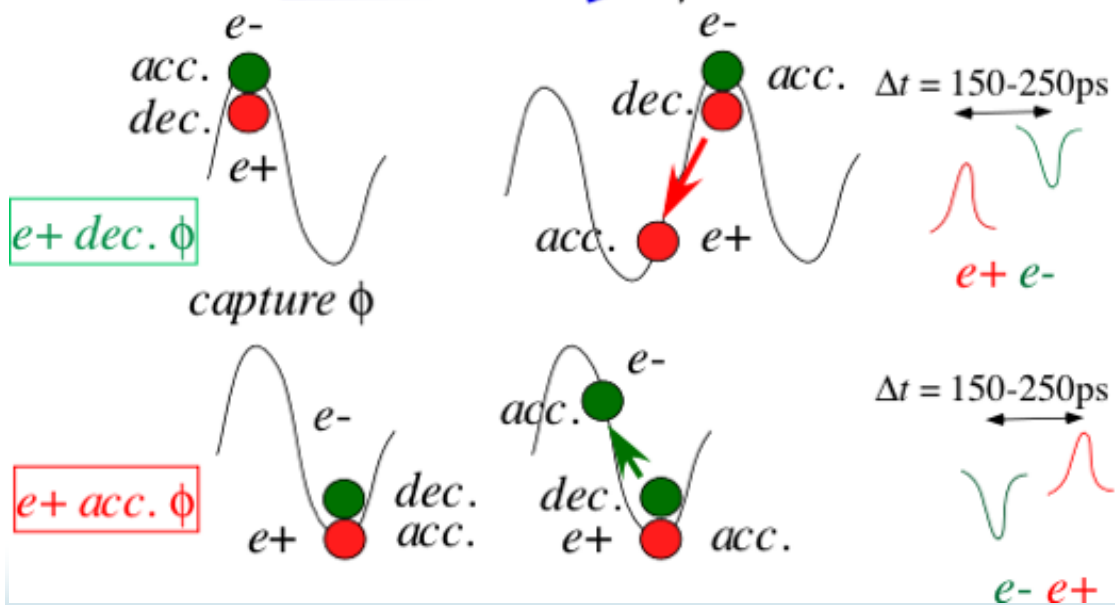
1. KEKB入射器陽電子源に電子(e^-)・陽電子(e^+)バンチ同時計測可能な広帯域モニターを2020年度夏期保守に設置.
2. 陽電子標的で生成される e^-e^+ バンチのバンチ長、電荷量、位置計測、バンチ間隔の同時分離計測に成功 (世界初の成果).
3. 高い放射線環境、狭いスペース、分離検出の困難という問題を克服.
4. 広帯域モニター開発にあたり、その動機、事前検討/設計、試験結果についての報告.

e^+ 捕獲部における e^+/e^- バンチ捕獲

e^+ beam generation system



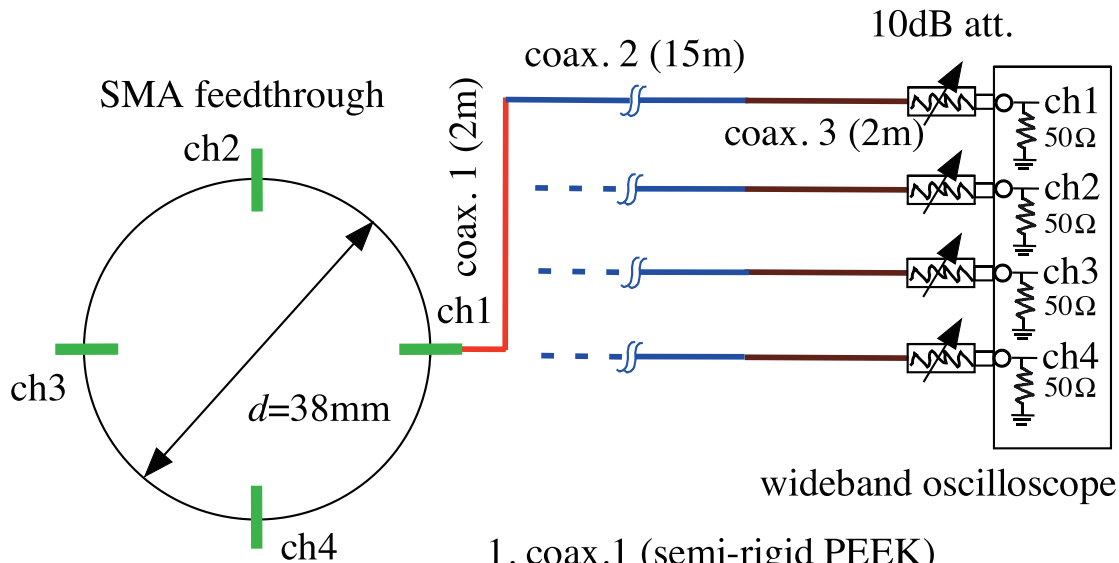
Phase slip process



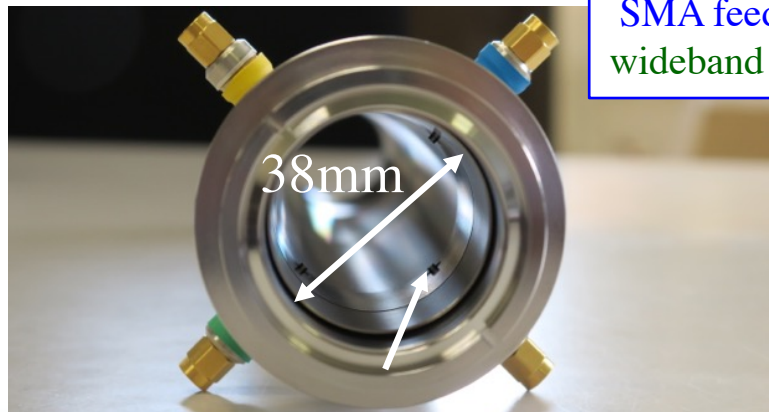
- Δt (ps) : time interval between e^+ and e^- bunches
- $l_{e^+} l_{e^-}$ (ps) : bunch lengths
- $Q_{e^+} Q_{e^-}$ (nC) : bunch charges
- **Line-order flip of e^- and e^+**

- e^+ 生成標的直後は e^+/e^- がほぼ等量生成され同時走行
- 加速位相に依存して e^+/e^- の走行順位が決まる → 順位逆転の検出
- バンチ間隔/バンチ長/バンチ電荷量は、重要な物理量 → 複雑な位相スリップ過程を支配するビーム力学の理解
- これまでの捕獲部には診断装置は一切無し、諸問題解決のために導入

信号測定系の構築

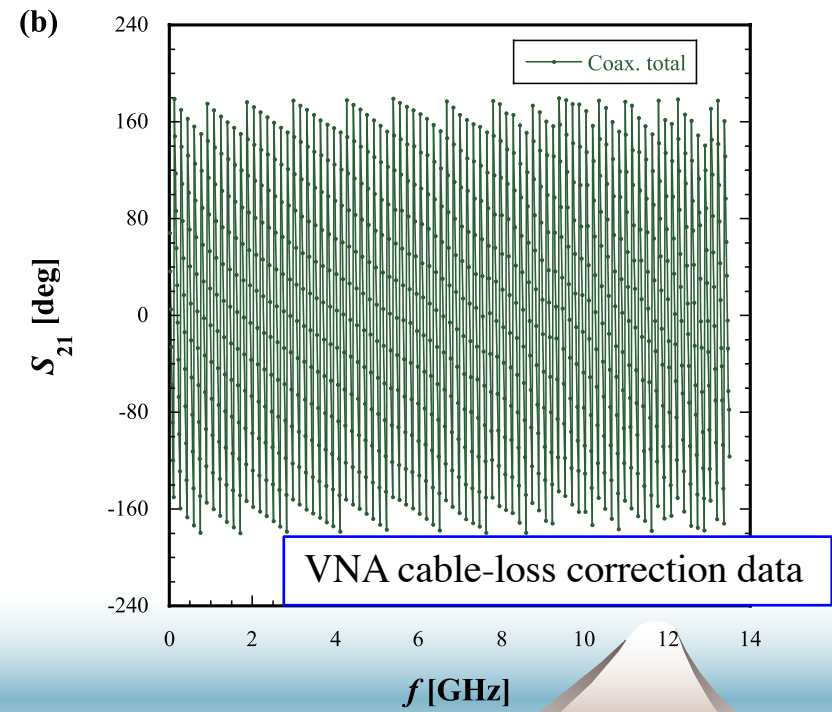
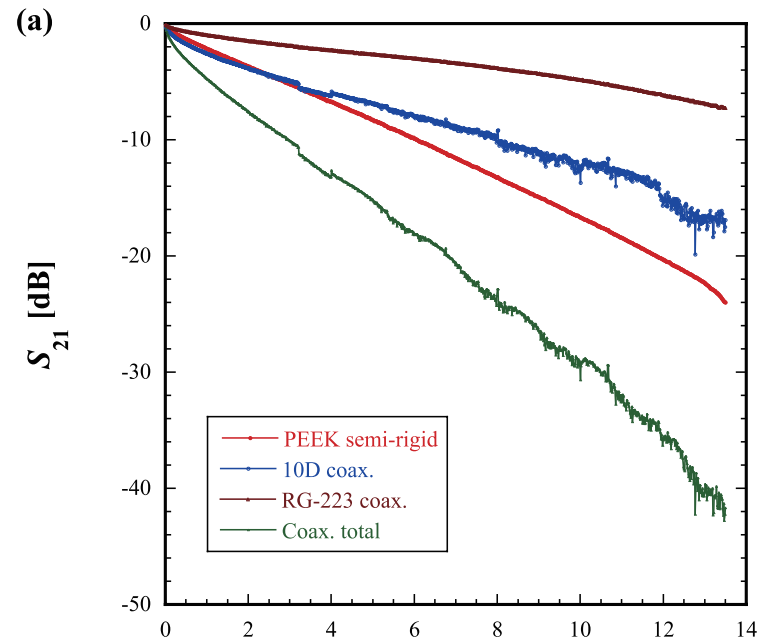


1. coax.1 (semi-rigid PEEK)
2. coax.2 (Fujikura Dia., 10D-HFB-CE)
3. coax.3 (RG-223)

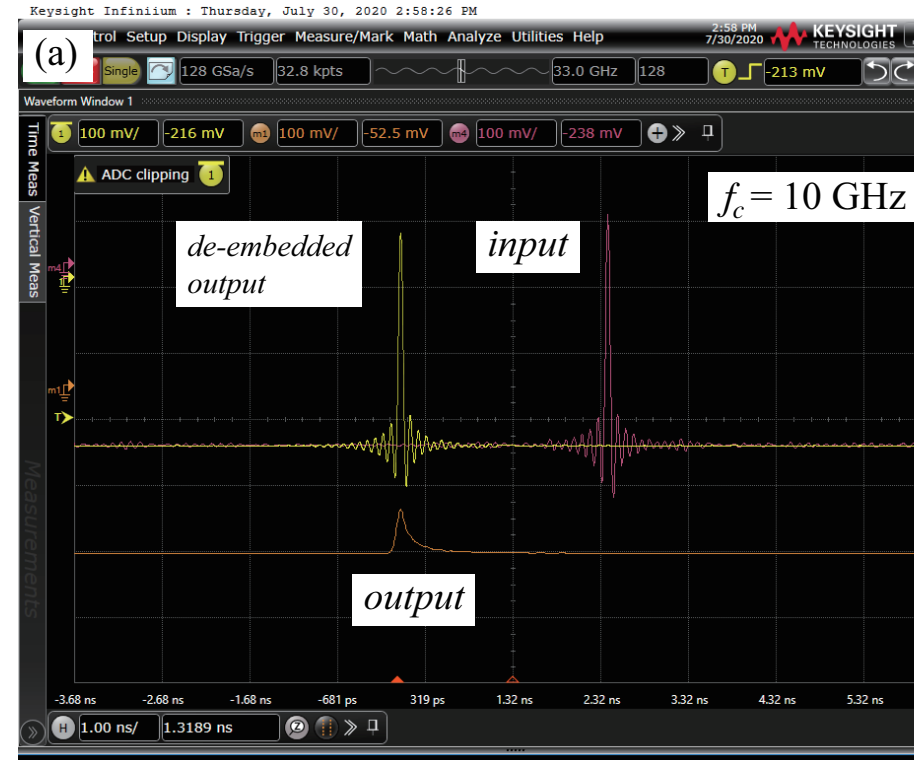
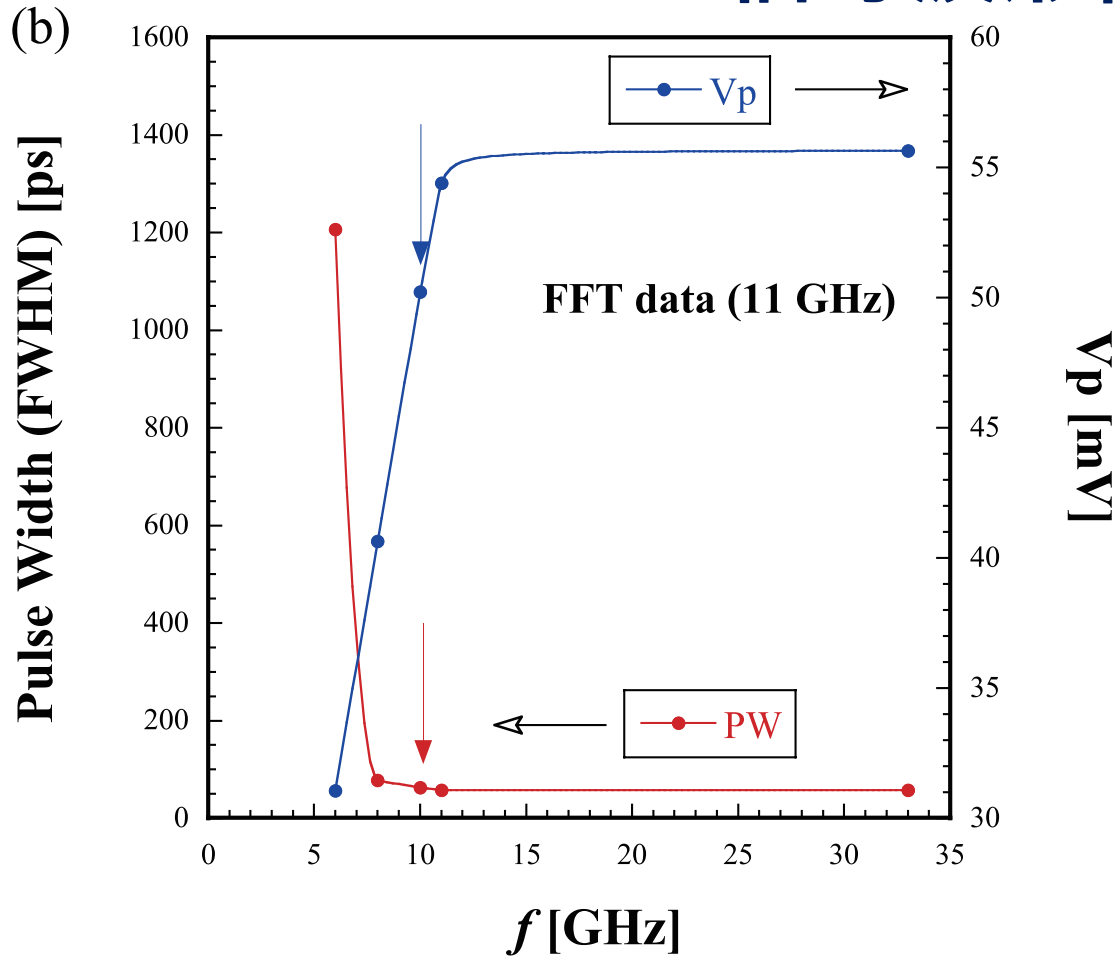


SMA feedthrough pickups + wideband oscilloscope

SMA feedthrough,
中心導体をモニター内壁面から1mm突出し

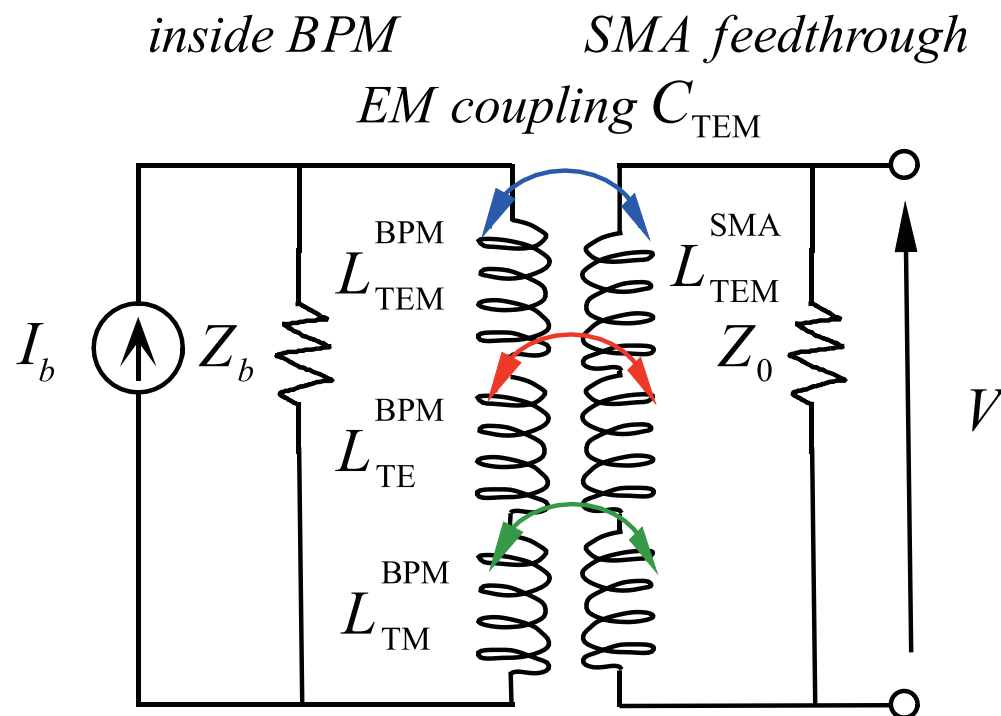
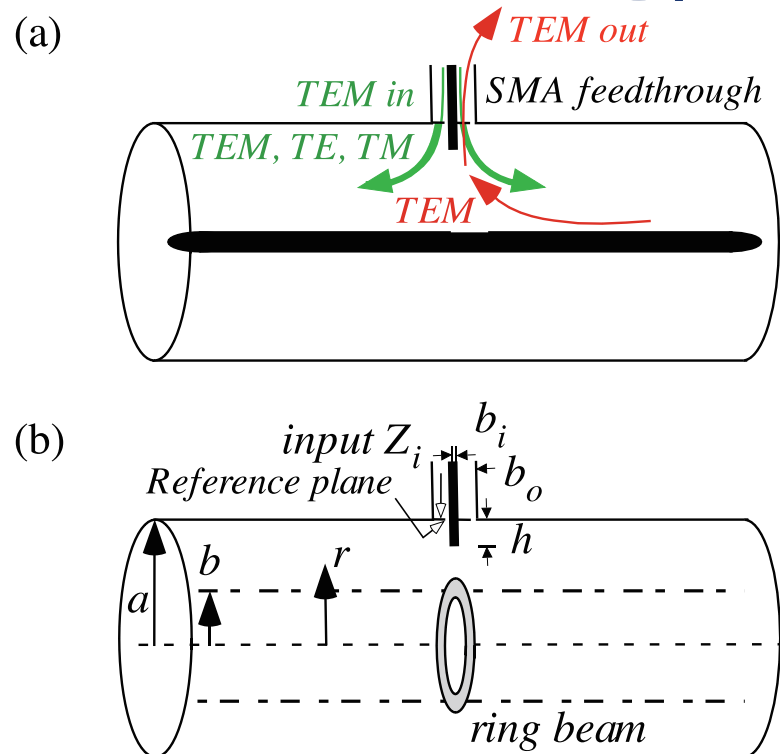


広帯域オシロの *de-embedding technique* による 信号波形補正



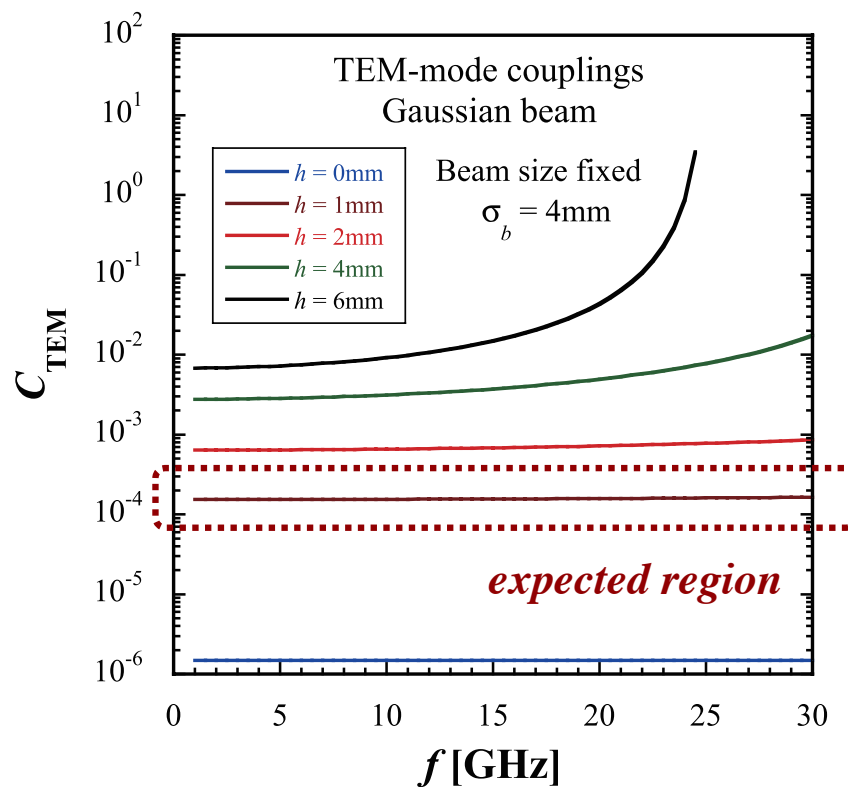
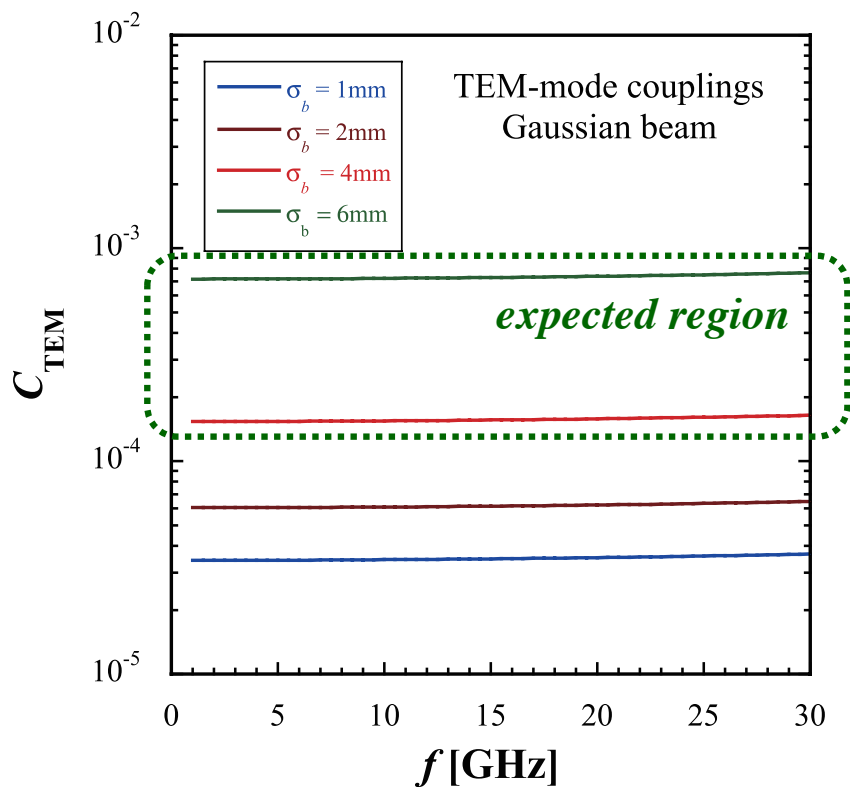
- ・ 高速テストパルサによるケーブル損失補正試験
 入力パルス: 30ps / FWHM, 出力パルス: 128ps / FWHM(補正無し)
 出力パルス: 63ps / FWHM @ 11GHzまでFFT補正有り

SMA電極とビームとの電磁結合



- (a) **結合モデル**, SMA同軸アンテナ(送信)-BPM同軸アンテナ(受信)による結合として考える. BPM同軸には表皮のみ電流が流れる.
- (b) BPM同軸をリングビーム(厚さ無)に置き換える. リングビームの横広がりをガウス分布に置き換え積分すると広がりのあるビームとの結合度が導出できる.
- (c) SMAを励振するとBPMにはTEM/TM/TEが励振される. BPMが励振されると高次モードは励振されるがSMAのカットオフにより結合しない.
- (d) **ビームの場合**, TEM結合だけを考えればよい. 解析の詳細は本報告を参照.

SMA電極とビームとの電磁結合強度の評価



- (left) ガウスビームによるTEM結合度の周波数依存性
- (right) ガウスビームによるTEM結合度のSMA端子突き出し長さ依存性

まとめ

1. 陽電子捕獲部に設置するコンパクト、広帯域、高周波損失補正機能(*signal de-embedding*, 10 GHzが必要)を有する広帯域モニターの検討により、*e+e-*バンドの分離検出が充分可能.
2. 高速テストパルスによる高周波損失試験によると、*signal de-embedding*により検出信号が時間領域で問題なく信号波形が回復することを検証.
3. ビームとSMA端子の結合解析では、SMA同軸-BPM同軸による結合解析をビームとの結合に応用した. 数値解析に基づき信号検出強度を算出、SMA端子の突出し長さの最適化.
4. ビーム試験の詳細は、T. Suwada, *et al.*, *Sci Rep* 11, 12751 (2021)参照.

SMA電極とビームとの電磁結合のモード解析

・ SMA励振時、基準面に励振されるTEM

$$E_{r0}(r) = \frac{1}{\sqrt{\ln(a/b)}} \frac{1}{r}, \quad E_{\phi0}(r) = 0, \quad (4)$$

・ SMA励振時、基準面に励振されるTE_{mn}

$$E_{r_{mn}}(r) = \frac{\sqrt{\pi}(m/r) [J_m(kc_{mn}r)N'_m(kc_{mn}b) - N_m(kc_{mn}r)J'_m(kc_{mn}b)]}{\sqrt{(J'_m(kc_{mn}b)/J'_m(kc_{mn}a))^2 [1 - (m/kc_{mn}a)^2] - [1 - (m/kc_{mn}b)^2]}} \quad (1)$$

$$E_{\phi_{mn}} = \frac{\sqrt{\pi}(kc_{mn}) [J'_m(kc_{mn}r)N'_m(kc_{mn}b) - N'_m(kc_{mn}r)J'_m(kc_{mn}b)]}{\sqrt{(J'_m(kc_{mn}b)/J'_m(kc_{mn}a))^2 [1 - (m/kc_{mn}a)^2] - [1 - (m/kc_{mn}b)^2]}} \quad (2)$$

$$E_{r_{mn}}(\phi) = \sin(m\phi), \quad E_{\phi_{mn}}(\phi) = \cos(m\phi). \quad (3)$$

・ SMA励振時、基準面からBPMを見たインピーダンス

$$Z_{in} = \frac{1}{2} \left[Z_{TEM} + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} Z_{TE_{mn}} + \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} Z_{TM_{mn}} \right] \quad (12)$$

$$Z_{out} = Z_{TEM}. \quad (13)$$

・ BPM励振時、基準面からSMAを見たTEM結合強度

$$C_{TEM} = \frac{Z_{out}}{Z_{BPM}}, \quad Z^{BPM} = \frac{\eta_0}{2\pi} \ln(a/b). \quad (14)$$

・ SMA励振時、基準面からBPMを見たインピーダンス

$$Z^{TEM} = \frac{\eta_0}{2\pi} \left[\int_{a-h}^a I(r) E_{r0}(r) dr \right]^2, \quad (6)$$

$$Z^{TE} = \frac{\eta_{mn}}{2\pi\sigma \int_a^b [E_{r_{mn}}^2(r) + E_{\phi_{mn}}^2(r)] r dr} \left[\int_{a-h}^a I(r) E_{r_{mn}}(r) dr \right. \\ \left. \times \int_{a-h}^a I(r) E_{r_{mn}}(r) F_{mn}(r, b_i) dr \right], \quad (7)$$

$$Z^{TM} = \frac{-jm^2 \eta_{mn}}{2\pi\sigma \int_b^a r^3 E_{\phi_{mn}}^2(r) dr} \left[\int_{a-h}^a I(r) E_{r_{mn}}(r) dr \right. \\ \left. \times \int_{a-h}^a I(r) E_{r_{mn}}(r) F_{mn}(r, b_i) dr \right], \quad (8)$$

$$\eta_{mn} = \frac{\eta_0}{\sqrt{1 - (kc_{mn}/\beta_0)^2}}, \quad \eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 376.7 (\Omega), \quad (9)$$

$$I(r) = \frac{\sin[\beta_0(h+r-a)]}{\sin(\beta_0 h)}, \quad (10)$$

$$F_{mn}(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-\gamma_{mn} b_i |\sin \theta|} \\ \times \cos \left[m \cdot \tan^{-1} \left(\frac{b_i \cos \theta}{r} \right) \right] d\theta. \quad (11)$$