

基于噪声与干扰抑制的5G波束检测算法与实现^{*}

江丹^{1,2} 刘祖深^{1,2} 安宇宁³

(1. 中电科思仪科技(安徽)有限公司 蚌埠 233010; 2. 电子测量仪器技术蚌埠市技术创新中心
蚌埠 233010; 3. 中北大学 太原 030051)

摘要:针对5G外场测试中,同频多小区检测受噪声和干扰影响的问题,提出一种改进的阈值选取方法。算法通过分块计算信噪比以及峰均比来确定检测门限,并且基于DFT的信道估计算法可以进一步降低噪声对信号检测的影响。检测出最强小区后,将其设为干扰信号,利用信号重构和干扰抑制算法,可以进一步提高有效5G小区的检测概率。在硬件实现上,充分利用DSP的多核并行信号处理能力,进一步提升分块检测的效率。仿真实验对比了不同场景下所提算法与传统算法的检测结果,平台实测验证了所提算法的有效性和可靠性。

关键词:干扰抑制;同频多小区;波束检测

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

5G beam detection algorithm and implementation based on noise and interference suppression

Jiang Dan^{1,2} Liu Zushen^{1,2} An Yuning³

(1. Ceyear Technologies (Anhui) Co., Ltd., Bengbu 233010, China; 2. Bengbu Technology Innovation Center on Electronic Measurement Instrumentation Technology, Bengbu 233010, China; 3. North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In this paper, an improved threshold selection method is proposed to solve the problem that the same frequency multi-cell detection, which is affected by noise and interference in 5G field testing. The detection threshold is determined by block calculation of signal-to-noise ratio and peak-to-average ratio, and the channel estimation algorithm based on DFT can further reduce the influence of noise on signal detection. After the first strong cell is detected, it is set as interference signal. Using signal reconstruction and interference elimination algorithm, the detection probability of effective 5G cell can be further improved. In hardware implementation, the multi-core parallel signal processing capability of DSP is fully utilized to further improve the efficiency of block detection. Simulation experiments compare the detection results of the proposed algorithm and the traditional algorithm under different scenarios, and the platform measurement verifies the effectiveness and reliability of the proposed algorithm.

Keywords: interference elimination; co-frequency multi-cell; beam detection

0 引言

在5G移动通信技术中,第三代合作伙伴计划(3rd generation partnership project, 3GPP)协议规定6 GHz以下频段单个小区广播信道最多可以支持8个波束,毫米波频段则以64个波束进行周期性扫描,以便让终端扫描到最优波束进行初始波束赋形^[1-4]。实际空口信号中,处在

小区边缘的用户可能会接收到来自多个小区的广播信号,并且这些信号可能存在同频同时并且功率相近的情况。这就可能导致终端在进行上下行同步的过程中,出现接入失败的情况,这无疑给终端的接入增加一定的难度。因此,对5G基站覆盖下的小区信号强度进行分析,以便设计出更优的基站布局,已经成为运营商在组网过程中亟需解决的问题^[5]。

收稿日期:2023-02-22

^{*} 基金项目:国家重点研发计划高性能物联网综合测试仪(2022YFF0706700)项目资助

5G 同频多小区信号检测分为小区搜索和波束检测两个方面。关于小区搜索,文献[6-9]提出了一种基于 PSS 序列的直接互相关的算法,通过寻找最佳匹配序列来完成小区组内标识的检测。文献[10]提出一种差分频域联合检测算法,该算法的基本思想是将本地理想的 PSS 序列与接收到的数据进行滑动相关,找到最大值即为初始同步位置。可以看出这类算法仅能检测出最强波束所在的小区,无法检测出所有的波束和小区。

关于波束检测,针对噪声抑制问题,文献[11]介绍了基于叠加分段的 PSS 定时同步算法,具体做法是将接收信号与本地 PSS 序列进行分段相关,算法能够一定程度上抑制加性高斯白噪声的影响。但在实际的外场测试中噪声成分复杂,其抑制噪声的能力有限。文献[12]提出了一种改进的 5GNR 小区搜索方法,其基本思想是将 3 组理想 PSS 序列与接收到的信号进行时域相关,然后对分段互相关结果进行处理,得到同步点的位置。该算法可以在一定程度上降低频率误差对检测结果的影响,但对检测门限的选取进行详尽的说明,并且检测算法没有对噪声和干扰进行处理,无法解决此场景下的同频多波束检测问题。文献[13]提出一种基于卷积神经网络的同步信号块检测算法,利用最大自相关准则和循环前缀的特性对接收的空口信号进行分段生成数据集,从而实现同步信号的检测。算法能够降低噪声和频偏对信号检测的影响,但其需要大量的数据集进行训练,所消耗的计算资源过大。并且对于时变快衰落信号,算法的适应性较差。

在工程实现上,为了进一步降低检测复杂度,文献[14]提出一种改进算法,通过对接收信号和本地 PSS 序列进行降采样,利用相关运算得到粗同步点,并在粗同步点附近恢复到原始采样率进行相关运算得到精同步点。该算法能够大幅度降低运算的复杂度,但是降采样的过程可能会导致信号的丢失,对频带边缘的信号无法进行有效检测。

针对扫频仪中的 5G 同频多小区检测问题,提出一种基于噪声与干扰抑制的检测方法,通过分块计算信噪比以及峰均比来确定门限的具体数值。并且基于 DFT 的信道估计算法可以进一步降低噪声对信号检测的影响。检测出最强小区后,将其设为干扰信号,利用信号重构和干扰消除算法,能够保证将有效的 5G 小区尽可能的检测出来。在平台实现上,为了进一步提高波束检测的效率,利用基于 DSP 的多核并行检测技术可以极大提升平台的检测性能。

1 系统模型

1.1 同步信号

5GNR 下行同步信号由 SSB 块构成,其中 PSS 与 SSS 信号组成小区唯一的标识。PBCH 信道承载小区的相应系统信息。SSB 块的时频资源分布如图 1 所示,其时域占 4 个 OFDM 符号,频域由 20 个资源块组成。

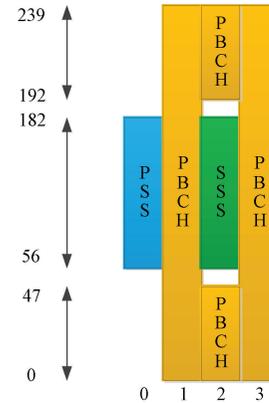


图 1 SSB 时频资源分布

5G PSS 信号同样采用 M 序列构成^[15],其序列长度为 127:

$$d_{\text{pss}}(n) = 1 - 2x(m) \quad (1)$$

式中:

$$m = (n + 43N_{\text{ID}}^{(2)}) \bmod 127, 0 \leq n < 127$$

$$x(i+7) = (x(i+4) + x(i)) \bmod 2, \text{ 并且:}$$

$$\begin{bmatrix} x(6) & x(5) & x(4) & x(3) & x(2) & x(1) & x(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

辅同步信号 SSS 为:

$$d_{\text{sss}}(n) = [1 - 2x_0((n + m_0) \bmod 127)][1 - 2x_1((n + m_1) \bmod 127)] \quad (2)$$

其中:

$$m_0 = 15 \left\lfloor \frac{N_{\text{ID}}^{(1)}}{112} \right\rfloor + 5N_{\text{ID}}^{(2)}$$

$$m_1 = N_{\text{ID}}^{(1)} \bmod 112$$

$$0 \leq n < 127$$

小区标识 $N_{\text{ID}}^{\text{cell}}$ 由式(3)唯一确定。

$$N_{\text{ID}}^{\text{cell}} = 3N_{\text{ID}}^{(1)} + N_{\text{ID}}^{(2)} \quad (3)$$

其中, $N_{\text{ID}}^{(1)} \in \{0, 1, \dots, 335\}$, $N_{\text{ID}}^{(2)} \in \{0, 1, 2\}$ 。

PBCH 信号其解调参考信号由伪随机序列构成:

$$r(m) = \frac{1}{\sqrt{2}}(1 - 2 \cdot c(2m)) + j \frac{1}{\sqrt{2}}(1 - 2 \cdot c(2m + 1)) \quad (4)$$

其中, $c_{\text{init}} = 2^{11}(\bar{i}_{\text{ssb}} + 1)(\lfloor N_{\text{ID}}^{\text{cell}}/4 \rfloor + 1) + 2^6(\bar{i}_{\text{ssb}} + 1) + (N_{\text{ID}}^{\text{cell}} \bmod 4)$, $\bar{i}_{\text{ssb}} = i_{\text{ssb}} + 4n_{\text{hf}}$, n_{hf} 为半帧指引。

1.2 同步信号时域分布

图 2 所示为 5G FR1 频段,子载波间隔为 30 kHz 下 SSB 在一个无线帧中的时域分布情况。从图 2 可以看出, 10 ms 时间内最多可以存在 8 个 SSB 块,并且 SSB 同步信息块只分布在一个无线帧的前半部分。

2 同频检测算法

2.1 传统检测算法

文献[12]提出两种检测算法,直接互相关算法的核心

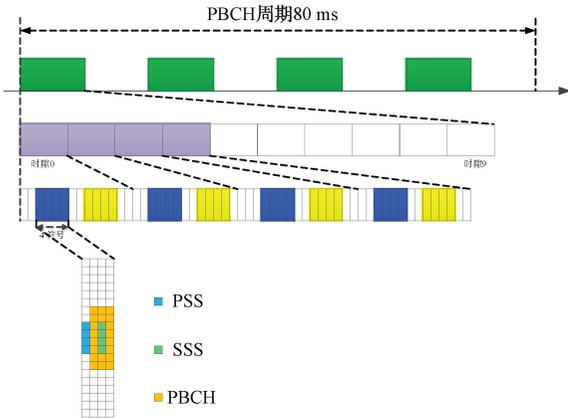


图2 无线帧中SSB的分布

是利用 PSS 接收序列与本地 3 组 PSS 序列分别进行滑动相关。

$$\begin{aligned} \text{Corr}_0(m) &= \left| \sum_{n=0}^{N_FFT-1} y(n+m)r_{pss}^0(n)^* \right|^2 \\ \text{Corr}_1(m) &= \left| \sum_{n=0}^{N_FFT-1} y(n+m)r_{pss}^1(n)^* \right|^2 \\ \text{Corr}_2(m) &= \left| \sum_{n=0}^{N_FFT-1} y(n+m)r_{pss}^2(n)^* \right|^2 \end{aligned} \quad (5)$$

其中 N_FFT 为快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 点数。则正确的 PSS 序列可以通过计算式 (5) 中 3 组相关结果中最大值来得到。

而分段互相关将本地 PSS 序列等分成 M 段, 将其与接收端序列进行相关, 再把 M 个相关值进行逐个相加。

$$\begin{aligned} \text{Corr}_0(m) &= \sum_{s=0}^{M-1} \left\{ \left| \sum_{n=0}^{N_FFT-1} y\left(n+m+s\frac{N_FFT}{M}\right) \cdot r_{pss}^0\left(n+s\frac{N_FFT}{M}\right)^* \right|^2 \right\} \\ \text{Corr}_1(m) &= \sum_{s=0}^{M-1} \left\{ \left| \sum_{n=0}^{N_FFT-1} y\left(n+m+s\frac{N_FFT}{M}\right) \cdot r_{pss}^1\left(n+s\frac{N_FFT}{M}\right)^* \right|^2 \right\} \\ \text{Corr}_2(m) &= \sum_{s=0}^{M-1} \left\{ \left| \sum_{n=0}^{N_FFT-1} y\left(n+m+s\frac{N_FFT}{M}\right) \cdot r_{pss}^2\left(n+s\frac{N_FFT}{M}\right)^* \right|^2 \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

通过计算 $\text{Corr}_0(m)$ 、 $\text{Corr}_1(m)$ 与 $\text{Corr}_2(m)$ 中的最大值对应的 m 的取值即为同步位置:

$$\hat{m} = \max_m \{ \text{Corr}_0(m), \text{Corr}_1(m), \text{Corr}_2(m) \} \quad (7)$$

并且取值最大的组编号即为小区组内标识 $N_{ID}^{(2)}$ 。该算法工程实现复杂度较低, 但处理实际空口信号时其检测结果容易受噪声影响。并且如果公网出现同频多小区覆盖的情况, 传统算法没有对同频强小区进行处理, 无法保证对空口覆盖下的所有小区进行有效检测。

2.2 改进的 5G 同频多小区检测算法

1) PSS 信号相关首强小区检测

根据 1.1 节生成 3 组理想 PSS 序列, 进行频谱搬移并执行 IFFT 运算, 得到时域信号 s_i , 将其与接收端信号进行相关运算:

$$P_i(\lambda) = \left\| \sum_{m=0}^{N_FFT-1} r(\lambda+m)s_i^*(m) \right\| \quad (8)$$

式中: $r(n)$ 为接收端时域信号; $s_i(n)$ 为理想的时域 PSS 信号; N_FFT 为 FFT 点数。

根据式 (8) 的相关运算结果, 计算 3 组相关结果的最大值, 如式 (9) 所示。

$$(\hat{i}, \hat{\delta}) = \max_{i, \lambda} \{ P_i(\lambda) \} \quad i = 0, 1, 2 \quad (9)$$

结合峰均比来确定是否为最强的 5G 小区:

$$f = \begin{cases} 1, & N \frac{P_i(\hat{\delta})}{\sum_{\lambda=0}^{N-1} P_i(\hat{\delta} + \lambda - \frac{N}{2})} > 5 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

若 f 的取值为 1, 则首强小区检测成功, 利用检测出的首强小区来计算最强波束对应的信号功率 σ_0 , 后续的检测门限根据计算出的信噪比来设定。

则 $N_{ID}^{(2)}$ 可由 \hat{i} 的取值来确定, 即:

$$N_{ID}^{(2)} = \hat{i} \quad (11)$$

2) 噪声与干扰抑制

正如传统算法所描述的, 若公网中出现图 3 所示的信号覆盖情况, 传统算法仅能够检测出其中 1 个波束, 而实际的波束有 3 个。因此必须在检测出强波束后, 采用抑制算法来检测其他较弱的波束。

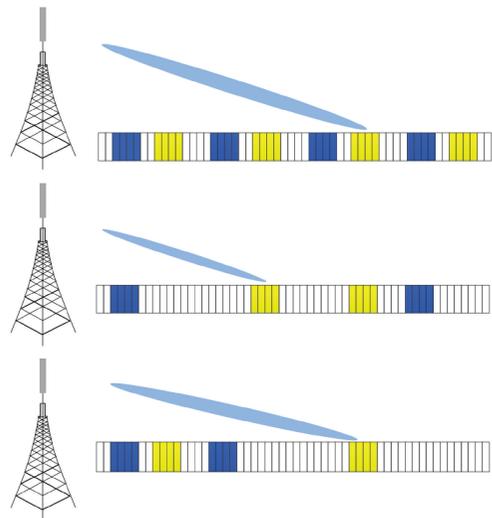


图3 空口信号同频多波束覆盖

信号检测与重构算法流程如图 4 所示, 主要由基于自适应门限的 PSS 相关的强小区检测和信号重构与重构检测

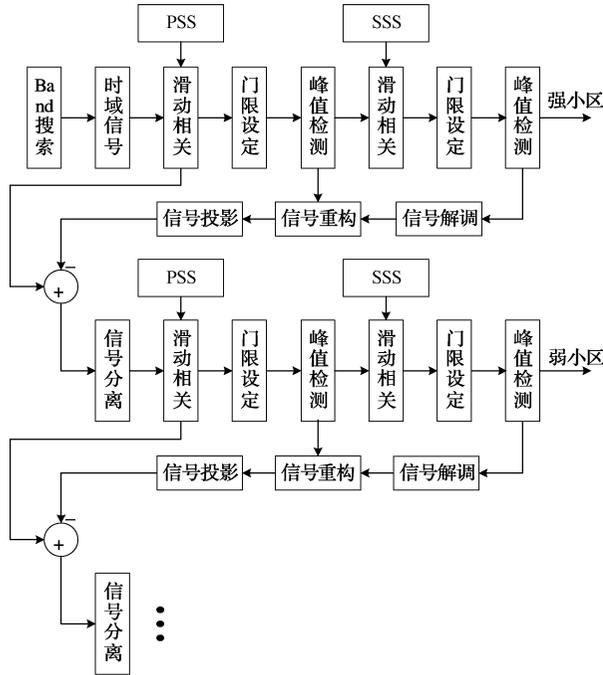


图4 小区检测与重构

等模块组成。

完成首强小区检测后,获得该小区的时域索引 $\hat{\delta}$ 。从 $\hat{\delta}$ 处取 N_FFT 个采样点的时域信号 $r(n)$ 进行 FFT 运算,利用最小二乘算法(LS)完成信道估计,得到 H_{LS} 。

$$H_{LS}(k) = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} r(n)e^{-j\frac{2\pi n}{N}k}}{X_{pss}(k)} \quad (12)$$

考虑到 LS 信道估计抗噪声性能差的问题,将 H_{LS} 进行快速傅里叶逆变换(IFFT)运算,得到时域信道脉冲响应 h_{LS} 。进行降噪处理:

$$h_{DFT}(n) = \begin{cases} h_{LS}(n), & n \leq N_{CP} \\ 0, & n > N_{CP} \end{cases} \quad (13)$$

式中: N_{CP} 为循环前缀长度。则噪声抑制后的信道频率响应 H_{DFT} 为:

$$H_{DFT}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} h_{DFT}(n)e^{-j\frac{2\pi n}{N}k} \quad (14)$$

进行首强小区的重构:

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H_{DFT}(k) X_{pss}(k) e^{j\frac{2\pi n}{N}k} \quad (15)$$

完成小区重构以后,可以将首强小区设定为干扰信号。则完成干扰抑制后的时域信号 $r'(n)$ 为:

$$r'(n) = r(n) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H_{DFT}(k) X_{pss}(k) e^{j\frac{2\pi n}{N}k} \quad (16)$$

3)分块检测

对于干扰抑制后的时域信号 $r'(n)$ 继续进行式(8)的相关运算,将结果划分为 N 个子块,图5所示为分块示意图。其中 $len = 2 \cdot N_FFT + 2 \cdot N_CP$ 。



图5 分块判决

对划分的每个子块计算相应的峰均比 s_n 和信号功率 σ_n 。则可以利用式(17)所述来判断是否为一个有效的5G小区。按照式(18)如果满足条件,则小区数目 $f_{count} + 1$,否则小区数目维持不变。

$$f_{count} = \begin{cases} f_{count} + 1, & s_n > 2 \cap \sigma_n > \sigma_0 - \Delta\sigma \\ f_{count}, & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

其中, $\Delta\sigma$ 的取值不能设置的过大,因为当 $\Delta\sigma$ 太大时,则受噪声影响的5G小区将出现漏检的情况。同时 $\Delta\sigma$ 也不能设的过小,当 $\Delta\sigma$ 过小时将会导致误检概率进一步提升。考虑到扫频仪的实际应用场景,经过大量外场测试,结果表明 $\Delta\sigma$ 的取值范围设为 $[10, 20]$ 可以保证较好的检测效果。

根据SSB的时频资源分布,提取接收端的时域SSS信号,将其变换到频域,与理想的频域SSS信号 $S_{ss,m}$ 进行共轭相乘,进而得到小区组标识 $N_{ID}^{(1)}$,其中 $S_{ss,m}$ 由式(2)来确定。

$$N_{ID}^{(1)} = \max_m \left\| \sum_{k=0}^{126} \sum_{n=0}^{N_FFT-1} r(n + 2 \cdot N_FFT + 2 \cdot N_CP) e^{-j\frac{2\pi n}{N}k} S_{ss,m}^*(k) \right\| \quad (18)$$

则 $N_{ID}^{(1)}$ 可由式(18)来确定。有效的小区标识 N_{ID}^{cell} 可由式(3)进行计算。

考虑到5G FR1频段最多配置8个SSB块,相应的波束 $Beam_{ID}$ 可以通过式(19)计算得到。

$$Beam_{ID} = \max_i \left\{ \left\| \sum_{m=0}^{N_FFT-1} y(m) d_i^*(m) \right\| \right\} \quad i = 0, 1, 2, \dots, 7 \quad (19)$$

式中: y 为接收端PBCH解调参考信号对应的时域信号; d_i 为理想的PBCH解调参考信号。

采用干扰和噪声抑制的PSS相关检测结果如图6所示。

对比图6(a)与(b)可以看出,如果不进行干扰抑制,则无法检测出 $N_{ID}^{(2)} = 1$ 和 $N_{ID}^{(2)} = 2$ 对应的波束,原因是其结果将会被 $N_{ID}^{(2)} = 0$ 的相关检测结果所覆盖。对比图6(a)与(b)中 $N_{ID}^{(2)} = 0$ 的检测结果可以看出,采用噪声抑制可以明显增加低信噪比对应波束的检测概率。

4)DSP多核并行分块检测

为了提高检测效率,对分块的相关运算结果按照式(18)所述的算法进行并行处理。DSP多核并行检测框图如图7所示。

如图7所示,利用DSP处理器的核0进行基带信号的分块检测,其他3个核分别进行分段相关和检测,最终的

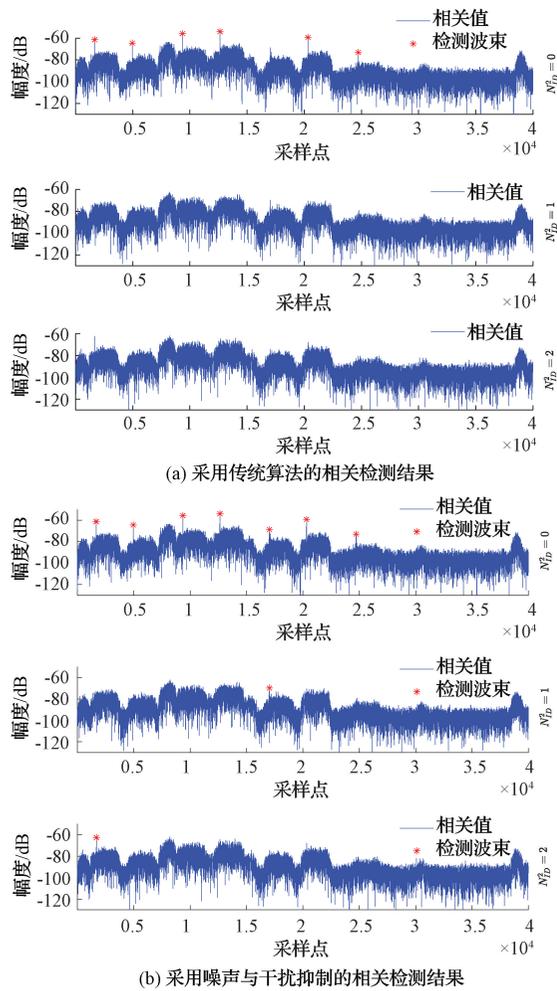


图6 不同算法相关检测结果

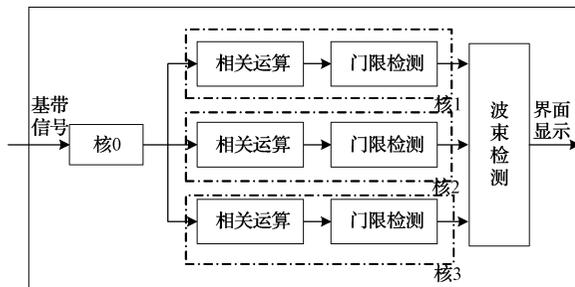


图7 DSP多核并行检测框图

检测结果通过软件界面来显示。

5) 算法流程

基于噪声与干扰抑制的同频多小区检测算法如下,算法的输出为小区标识以及波束标识。

噪声与干扰抑制的同频多小区多波束检测算法

输入:接收端信号 $r(n)$

输出:小区标识 N_{ID}^{cell} ,波束标识 $Beam_{ID}$

- 步骤1:根据式(1)生成3组理想的PSS信号;
- 步骤2:根据式(8)进行时域相关运算,得到 $P_i(\lambda)$;
- 步骤3:利用式(9)进行首强小区检测,小区组内标识 $N_{ID}^{(2)}$ 由式(11)计算得到;
- 步骤4:利用式(12)~(16)进行首强小区重构,完成重构以后,将首强小区设为干扰信号,相应的干扰抑制方法如式(16)所示,得到 $r'(n)$;
- 步骤5:计算小区组标识 $N_{ID}^{(1)}$,小区标识 N_{ID}^{cell} 可由式(3)得到;
- 步骤6:重复步骤2~5,直到满足式(16)的所有小区全部检测完成;
- 步骤7:对检测出的5G小区进行波束标识检测,如式(19)所示。

3 仿真与实测

为了验证算法的检测成功概率,将本文所提算法与传统算法进行对比,并分析了不同场景下的检测结果。仿真共分为以下3个场景,其中每个结果通过1000次独立实验求平均得到。

场景1为单个小区配置下改变测量点与基站间距离的情况下的检测概率。

场景2为单个小区配置下不同信噪比情况下的检测概率。

为了验证重构与干扰抑制算法的有效性,场景3给出了与最强小区RSRP值相差15dB以内所有小区的检测概率仿真结果。

仿真所用信道为wiener2信道模型,发送端信号设定为4个小区,7个波束。

定义检测成功概率函数:

$$\rho = \frac{N_{\text{success}}}{N_{\text{total}}} \quad (20)$$

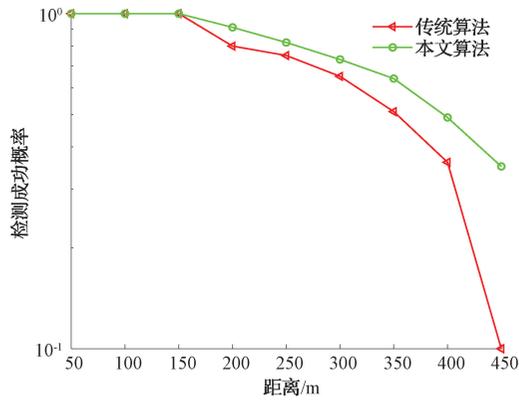
式中: N_{success} 为成功检测次数; N_{total} 为总次数,实验中通常设为1000。仿真条件如表1所示。

表1 仿真条件

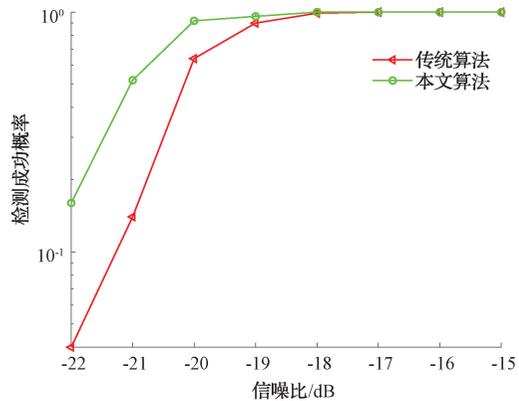
仿真参数	取值
载波频率/GHz	3.5
子载波间隔/kHz	30
信号带宽/MHz	100
小区数目	4
波束数目	7
SNR/dB	[-22, -21, -20, -19, -18, -17, -16, -15]
测量距离/m	[50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450]
噪声类型	高斯白噪声

3.1 仿真与结果分析

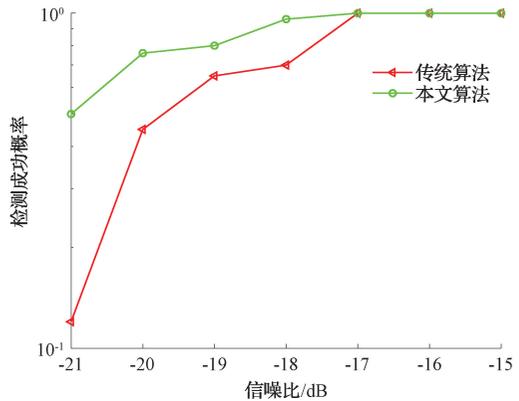
图 8(a)所示为单个小区配置下改变测量点与基站间距离的情况下,两种算法的检测成功概率;图 8(b)所示为单个小区配置不同信噪比情况下的检测成功概率;图 8(c)所示为与最强小区 RSRP 值相差 15 dB 以内所有小区的检测概率。



(a) 场景1不同算法的检测成功概率



(b) 场景2不同算法的检测成功概率



(c) 场景3不同算法的检测成功概率

图 8 不同场景下检测成功概率

由图 8(a)可知,当距离小于 150 m 时,两种算法具有相同的检测概率。当测量距离增大,本文所提算法具有的检测概率较传统算法更具优势。由图 8(b)可知,当信噪

比大于 -18 dB 时,两种算法具有相同的检测概率。当噪声进一步扩大,本文所提算法在低信噪比的情况下具有更好的性能。原因在于所提的自适应门限选取方法以及基于 DFT 的信道估计算法具有较好的抗噪声性能。由图 8(c)可知,当信噪比为 -18 dB 时,本文所提算法针对与最强小区 RSRP 值相差 15 dB 以内所有小区的检测概率为 90% 以上,而传统算法仅为 70%。基于信号重构与干扰抑制的方法可以进一步提高小区的检测概率。

3.2 平台实测

外场测试仪基带信号处理流程如图 9 所示。

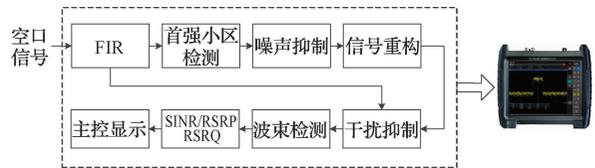


图 9 外场测试仪基带处理流程

其中, FIR 模块主要用于多速率滤波, 首强小区检测、噪声抑制、信号重构、干扰抑制、波束检测以及信号强度计算主要在 DSP 完成。

利用平台进行 5G 商用基站同频多小区测试的具体流程如图 10 所示。

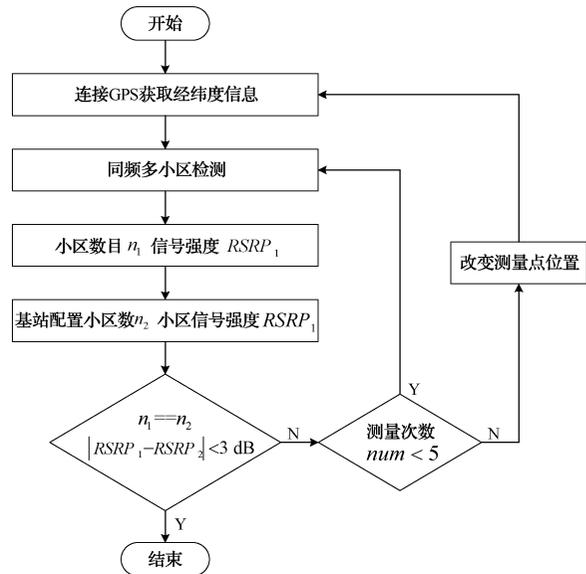


图 10 5G 商用基站同频多小区测试流程

启动测试平台,并连接 GPS 天线,获取测量点的经纬度信息,以便进行小区的锁定。连接射频天线,进行同频多小区检测。记录搜索出的 5G 小区数目 n_1 以及信号强度 $RSRP_1$,并与基站配置的小区数目及信号强度进行对比。如果测试结果不满足 $|RSRP_1 - RSRP_2| < 3$ dB,统计其次数 num 。如果 num 数目超过 5 次,则更改测量点进行后续的检测。

利用外场测试仪平台对 5G 商用基站进行实测,测试

点距离基站间直线距离为 200 m,检测结果如图 11 所示。

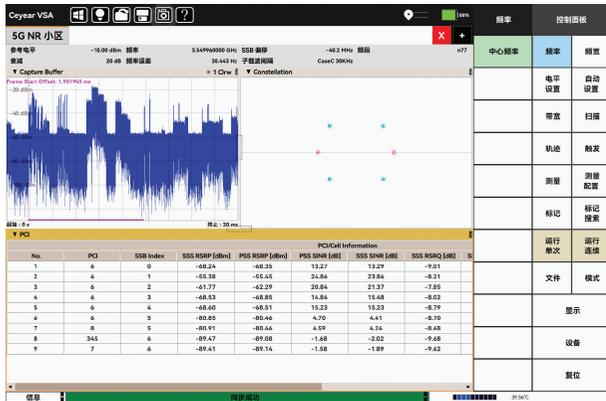


图 11 5G 波束检测结果

从图 11 可以看出,在载波频率为 3.509 76 GHz 上检测出 4 个 5G 小区以及 7 个波束。实测结果表明所提算法能够检测出与最强小区 RSRP 相差 20 dB 以内的所有 5G 小区。

4 结论

本文针对 5G 外场测试中,同频多小区检测受噪声和干扰影响的问题,提出一种改进的阈值选取方法,通过分块计算信噪比以及峰均比来确定门限的具体数值。为了进一步降低噪声对检测的影响,采用基于 DFT 的信道估计对噪声进行抑制。检测出最强小区后,将其设为干扰信号,利用信号重构和干扰抑制算法,可以进一步提高 5G 小区的检测概率。当前,算法已成功应用于国产扫频仪中,下一阶段将考虑毫米波频段的同频多小区检测问题。

参考文献

- [1] 申敏,梁晶,侯嘉智. 波束扫描下 5G 毫米波小区搜索算法[J]. 电信科学, 2020, 36(6): 97-106.
- [2] 程远杰,姜雪松. 5G 基站信号调制质量测试算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(11): 109-113.
- [3] SEUNGHWAN W, SANG W C. A tutorial on 3GPP initial cell search: Exploring a potential for intelligence based cell search[J]. IEEE Access, 2021, 9: 100223-100263.
- [4] DAISUKE I, KYOGO O, MAMORU S, et al. Physical cell ID detection using joint estimation of frequency offset and SSS sequence for NR initial access[C]. IEEE 93rd Vehicular Technology Conference, 2021.
- [5] 罗德与施瓦茨联合中国移动推出业界首款 5G 宽带扫

频仪[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(1): 170.

- [6] JEON Y, PARK H, CHOI E. Synchronization and cell search procedure in 3GPP 5G NR systems[C]. 2019 21st International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). IEEE, 2019: 475-478.
- [7] IGOR K, JUNGSUN U, SEUNGKEUN P. Implementation of SDR-based 5G NR cell search equipment[C]. 2020 22nd International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). IEEE, 2020: 350-353.
- [8] 刘慧,刘祖深,许虎,等. 5G NR 小区搜索算法研究及 FPGA 实现[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(6): 152-158.
- [9] JIA L Y, MING C L, WEI H H, et al. A novel network resolved and mobile assisted cell search method for 5G cellular communication systems[J]. IEEE Access, 2022, 10: 75331-75342.
- [10] 孙倩楠,张治中. 5G 系统小区搜索 PSS 定时同步方法[J]. 电讯技术, 2020, 60(6): 678-683.
- [11] 江航,曹龙汉,张治中,等. 一种 5G NR 系统 PSS 叠加分段的定时同步算法[J]. 电讯技术, 2021, 61(4): 476-481.
- [12] 董宝江,彭琛,卢贺. 5G NR 的小区搜索改进算法[J]. 电信科学, 2021, 37(2): 48-54.
- [13] 李晓辉,王先文,樊韬,等. 基于卷积神经网络的高性能 5G 下行同步算法[J]. 北京邮电大学学报, 2022, 45(2): 117-123.
- [14] 张德民,李秀,陈嘉田. 5G 系统中主同步信号定时同步算法的研究[J]. 光通信研究, 2019(3): 59-64.
- [15] 3GPP. NR-physical channels and modulation(Release 15): TS 38. 211, V15. 0.0[S]. 2018.

作者简介

江丹, 硕士, 工程师, 主要研究方向为 5G、太赫兹通信技术。

E-mail: danjiang01@126.com

刘祖深, 博士, 研究员级高工, 主要研究方向为微波通信测量技术与仪器研究与开发工作。

E-mail: eibb@ei-electro.com

安宇宁, 硕士研究生, 主要研究方向为 5G 毫米波、太赫兹移动通信测试技术。

E-mail: anyn1017@163.com