

FFT-CZT 技术在单天线 LFMCW 无线电高度表中的应用^①

曾国奇^{②*} 李思吟^{**} 王 松^{*} 齐电海^{*} 饶赣新^{***}

(^{*} 北京航空航天大学无人机驾驶飞行器设计研究所 北京 100191)

(^{**} 北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

(^{***} 贵航飞机设计研究所科技开发部 安顺 561000)

摘 要 设计了单天线线性调频连续波(LFMCW)无线电高度表系统,该系统采用矢量对消技术抵消来自环形器泄漏和天线驻波反射的信号。采用快速傅立叶变换(FFT)与线性调频 Z 变换(CZT)相结合的技术(称为 FFT-CZT 技术)对发射信号和回波信号混频后的中频信号进行频谱分析(先用 FFT 技术进行频谱粗分析,再用 CZT 技术进行频谱细分析),以解决频率分辨率与计算时间的矛盾,提高系统的测量精度和抗干扰能力。仿真分析了单天线 LFMCW 无线电高度表系统的工作过程。仿真分析结果表明:将 FFT-CZT 技术应用于单天线 LFMCW 无线电高度表中是可行的;与传统的模拟体制相比,系统的测量精度和抗干扰能力明显提高,系统可应用于除零高度以外的高度测量中。

关键词 线性调频连续波(LFMCW),无线电高度表,单天线,FFT-CZT,矢量对消器

0 引 言

线性调频连续波(linear frequency modulated continuous wave, LFMCW)无线电高度表是通过回波信号与发射信号进行差拍得到高度值的一种测高装置,具有辐射功率小、精度高、设备相对简单、抗干扰能力强以及截获概率低等优点^[1]。普通的 LFMCW 无线电高度表需要采用收发满足一定隔离度要求的两个天线,而采用矢量对消器的 LFMCW 无线电高度表只需要一个天线^[2],可以广泛应用于小型无人机、导弹等对安装位置非常紧凑的场合。

传统的 LFMCW 无线电高度表采用模拟体制,利用搜索鉴频器和跟踪鉴频器实现对稳定差拍信号的跟踪^[3]。随着数字技术尤其是微处理机在高度表中的应用,调频连续波体制无线电高度表取得了很大进展,这类高度表对差拍信号采用数字信号处理技术,这不同于先前的时域处理方式,其常用的算法是快速傅立叶变换(FFT)算法^[4]。但是因为 FFT 算法是在 Z 域整个单位圆上进行频谱分析,所以其频率分辨率为 f_s/N , 其中 f_s 为采样频率, N 为信号 $x(n)$ 的有效长度,要想提高测高精度只能增加信号

$x(n)$ 的截取长度,但这样会使计算量大大增加。考虑到线性调频 Z 变换(Chirp Z-Translation, CZT)算法^[5-7]是广泛用于频谱分析和测量的频谱局部细化方法之一,本研究采用将 FFT 和 CZT 相结合的 FFT-CZT 算法替代传统的鉴频器对差拍信号进行处理的技术,探索了其在采用矢量对消器的单天线 LFMCW 无线电高度表系统中的应用;经过粗搜索和精确细分两个步骤实现对差拍频率的精确快速分析,并对单天线 LFMCW 无线电高度表的搜索和跟踪过程进行了仿真,并将仿真结果与传统的模拟体制进行了比较。结果表明,FFT-CZT 技术可明显提高系统的测量精度和抗干扰能力。

1 FFT-CZT 算法

CZT 算法是频谱局部细化的方法之一,在较低的系统信噪比和非点目标环境下该算法可以大大提高 LFMCW 雷达的精度。本研究采用的 FFT-CZT 算法先利用 FFT 对回波信号的差拍频谱进行粗测,然后运用 CZT 对频谱主瓣进行局部细化,降低差拍频谱上的采样间隔,达到提高测量精度的目的,计算量与直接增加采样点数的 FFT 算法相比要少得多。

① 863 计划(2008AA121802)和航空基金(2009ZC51026)资助项目。

② 男,1978 年生,博士,工程师;研究方向:无线电测量,电磁兼容;联系人, E-mail: zengguoqi@buaa.edu.cn
(收稿日期:2012-04-12)

对差拍信号进行 N 点的快速傅里叶变换时,要对变换的结果求模,进行频谱判决并确定差拍频率值,若差拍频率位于设置的门限范围内,高度表系统进入跟踪态,并通过 CZT 将附近频带频谱进行细化。对于恒差拍测高系统,细化频带范围实际上是相对固定的,因此 CZT 的测量精度直接影响着 FFT-CZT 处理的精度。整个系统形成一个完整的闭环系统,最终使差拍频率稳定至额定值,根据调制波周期计算当前高度值。

在进行 CZT 时,首先设采样序列 $x(n)$ 的长度为 N , 序列在 Z 平面上 N 点的频谱采样值为 $X(Z_n)$, $0 \leq n \leq N$, 该信号的 z 变换为

$$X(z) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)z^{-n} \quad (1)$$

令 z 域的采样点 z_k 为

$$z_k = AW^{-k}, 0 \leq k \leq M-1 \quad (2)$$

式中 A 和 W 为任意复数,用极坐标形式表示为

$$\begin{cases} A = A_0 e^{j\theta_0} \\ W = W_0 e^{-j\varphi_0} \end{cases} \quad (3)$$

式中 M 为要分析的复频谱点数,不一定与 N 相等; A 为取样轮廓线的复数起点; W 为取样轮廓线上各点之间的比率; A_0 为取样起始样点的矢量半径; W_0 为控制取样轮廓线向内还是向外弯曲; θ_0 为起始采样点的相角; φ_0 为相邻采样点的角频率差。

将式(3)代入 z 变换式(1),则有

$$X(z_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)A^{-n}W^{kn}, 0 \leq k \leq M-1 \quad (4)$$

利用布鲁斯坦等式

$$nk = \frac{1}{2}[n^2 + k^2 - (k-n)^2] \quad (5)$$

可得

$$X(z_k) = W^{\frac{k^2}{2}} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} [x(n)A^{-n}W^{\frac{n^2}{2}}] \cdot W^{\frac{-(k-n)^2}{2}} \quad (6)$$

在以上参数中, A_0 决定螺旋曲线的起始半径, W_0 决定其盘旋趋势。当 $A_0 = W_0 = 1$ 时,表示 CZT 的路径在单位圆上。

在实现高精度测量时,FFT-CZT 方法比 FFT 方法更容易实现,这一点可以通过两种方法的计算量及计算精度对比的结果得到。对于 $N = 2^M$ 的离散傅立叶变换(DFT)按库利—图基 FFT 算法进行计算,总共要分 M 级,每一级有 $\frac{N}{2}$ 个蝶形,因此完成 FFT 需要做的复数乘法次数为

$$m_F = \frac{N}{2} \cdot M = \frac{N}{2} \cdot \log_2 N \quad (7)$$

采用 CZT 做频谱分析时,截取信号长度 N , 在其 z 变换域上进行 M 点的频谱采样,另外选择一序列长度 L , 使其满足关系式 $L \geq N + M - 1$, 此 L 为求离散线性卷积不出现混叠所需的变换长度,此时所需计算的乘法次数为

$$m_C = N + M + L + L \log_2 L \quad (8)$$

在理想点目标的情况下,分别用 512 点 FFT、2048 点 FFT 和 $N = M = 512$ 点 CZT 对带有随机噪声的额定差拍信号分别进行频谱分析,计算测量误差,结果如表 1 所示。

表 1 FFT 及 CZT 测量误差比较

	FFT(512)	FFT(2048)	CZT(512)
乘法运算量	4608	11264	11264
测量差拍频率(kHz)	25.39	24.902	25.029
额定差拍频率(kHz)	25	25	25
误差	1.56%	0.392%	0.116%

通过分析可知,在相同运算量的情况下,CZT 的测量误差要比 FFT 小得多。这从理论上不难解释:FFT 是在 Z 平面整个单位圆上进行等间隔取样,所以其频率分辨率限制为 f_s/N , 而 CZT 是在 Z 平面单位圆上取一个自定义的弧段,并在该弧段上进行 Z 变换的均匀取样,在进行局部细化时,所取弧段对应于待细化的窄带,则 CZT 算法结果就是窄带中各频率点处的频谱值,此时其频率分辨率为 $(f_2 - f_1)/N$ 。

2 FFT-CZT 在单天线高度表系统中的应用

2.1 单天线 LFMCW 无线电高度表系统

图 1 为单天线 LFMCW 无线电高度表的系统框图。系统收发共用一个天线,采用环形器隔离,利用矢量对消器对从环形器泄露出的信号和天线驻波反射的信号进一步对消,采用锯齿波发生器控制射频源产生频带固定的 LFMCW 发射信号,采用 FFT-CZT

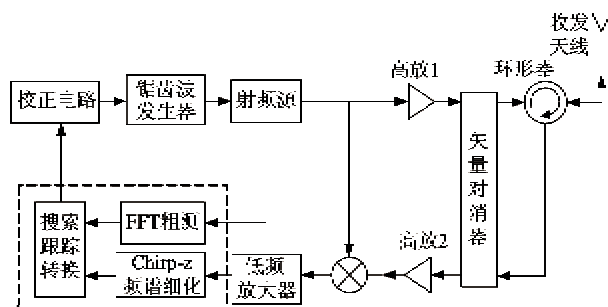


图 1 单天线 FMCW 无线电高度表结构框图

代替传统模拟处理方式中的控制及跟踪鉴频器来实现对差拍信号的处理,使稳态下的差拍频率值更接近额定值,从而能更精确地校正调制锯齿波的斜率,最终得到更加精确的高度值。

图 2 为图 1 系统中矢量对消器结构框图,系统包含两个独立的 I 支路和 Q 支路,工作时未被对消的泄漏信号通过正交鉴频器被检测出来,分 I、Q 两路被分别经过放大和低通滤波后,提供给矢量调制器作为调制信号。通过矢量调制器的控制,对耦合过来的射频信号进行幅度和相位的调节,使对消信号与泄漏信号的幅度相同,相位相差 180° ,两者叠加,达到对消的效果。泄漏信号的能量减小,可避免接收机的灵敏度降低及接收机饱和等问题。

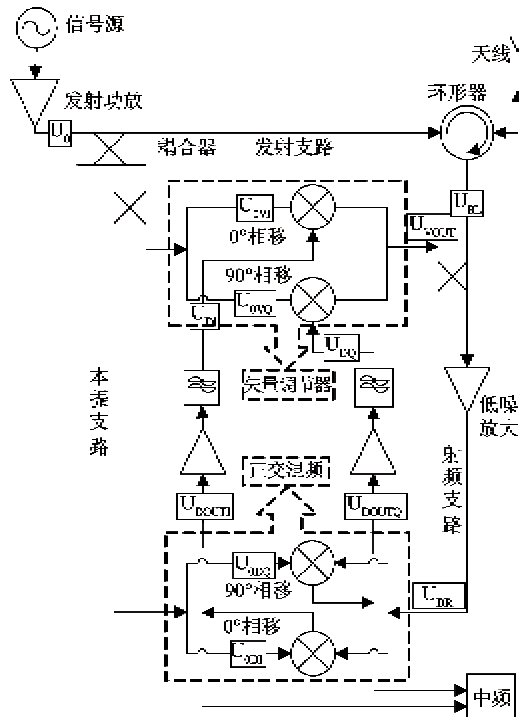


图 2 矢量对消器框图

无线电高度表系统的工作过程可大致分成搜索和跟踪两种状态。在搜索过程中先应用 FFT 来确定在当前高度下,与其对应的差拍频率值落入门限范围内的调制锯齿波斜率的大致范围,在系统进入跟踪态后,采用 CZT 在额定差拍值附近进行频谱细化分析,通过实际值与额定值间的差异进一步校正调制锯齿波的斜率,若在容差范围内,差拍频率稳定至约 25kHz 时,系统计算输出当前高度值。

2.2 参数设计

FFT 变换的计算点数与仿真的采样间隔紧密相关。本研究中调制带宽, $f_B = 50\text{MHz}$, 采样间隔设为

f_s , 与采样间隔的关系式为 $f_s = 2.5f_B$, 稳定跟踪后的混频频率为 $f_b = 25\text{kHz}$ 。假设射频发射机到天线的射频电缆长度 $l = 3\text{m}$, 天线为 4 单元微带天线阵, 天线增益为 8dB, 驻波比为 1.2。在进行 FFT 时采样点的个数为 N_{FFT} , 其频率分辨率为 $\Delta f_{\text{FFT}} = f_s/N_{\text{FFT}}$ 。搜索态下用于判断是否可以转换至跟踪态的门限频率范围设为 $[20\text{kHz}, 30\text{kHz}]$ 。

当系统转换至跟踪态下时, CZT 会在局部频谱范围 $[f_1, f_2]$ 内作细化分析, 本系统中 $f_1 = 23\text{kHz}$ 为起始频率, $f_2 = 27\text{kHz}$ 为终止频率, 则当计算点数为 M 时, CZT 的频率分辨率为 $\Delta f_{\text{CZT}} = (f_2 - f_1)/M$ 。

用 CZT 算法时, 因为弧段取在单位圆上, 所以 $A_0 = W_0 = 1$, 余下的两个参数通过以下计算得到:

$$\begin{cases} A = A_0 \exp[-j2\pi f_1/f] \\ W = W_0 \exp[-j2\pi(f_2 - f_1)/(M \cdot f_s)] \end{cases} \quad (9)$$

3 仿真结果及分析

系统的仿真流程图如图 3 所示。系统分为搜索态和跟踪态, 在搜索态下采用 FFT 进行频谱分析, 在跟踪态下采用 CZT 进行频谱细化, 采用矢量对消器对泄漏信号进行抑制。

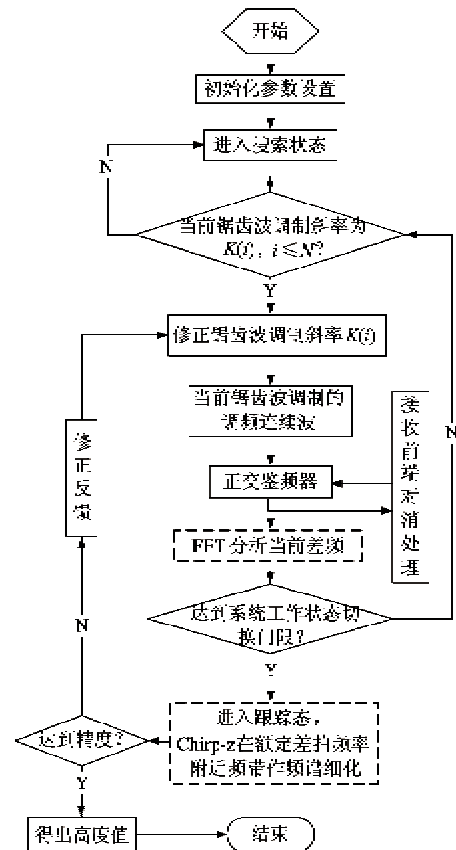


图 3 单天线 LFM CW 无线电高度表数字化处理仿真流程图

图4和图5分别为搜索态时发射的调制LFMCW时域和频域信号,图6为经过FFT粗分析的频谱,仿真中接收信号增加了信噪比(SNR)为15dB的高斯白噪声信号。

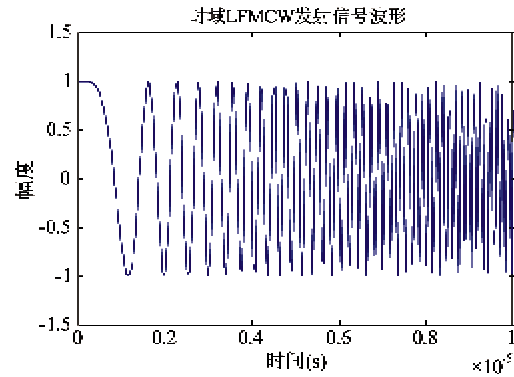


图4 FMCW发射信号时域波形

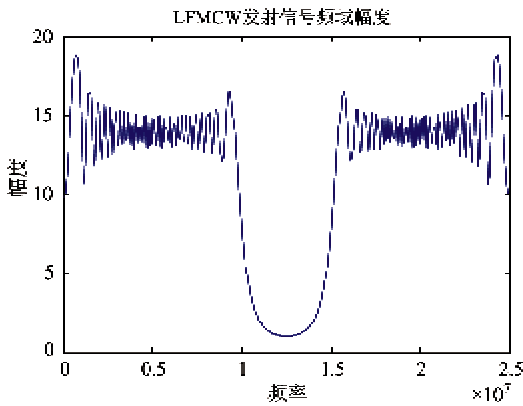
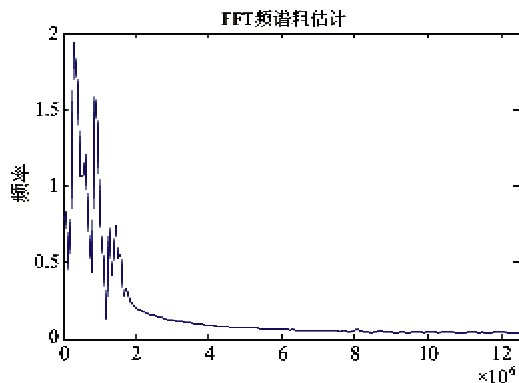


图5 LFMCW发射信号频域幅度



(接收信号增加SNR = 15dB的高斯白噪声)
图6 混频信号频谱初估计频谱

通过改变锯齿波的调制斜率可以使差拍值达到门限后,搜索过程终止,系统进入跟踪态,通过CZT对额定差拍频率附近频谱进行细化,此处取在局部频谱 $[f_1, f_2]$ 内作细化分析,计算点数设为512,得到的校正过程如图7所示。

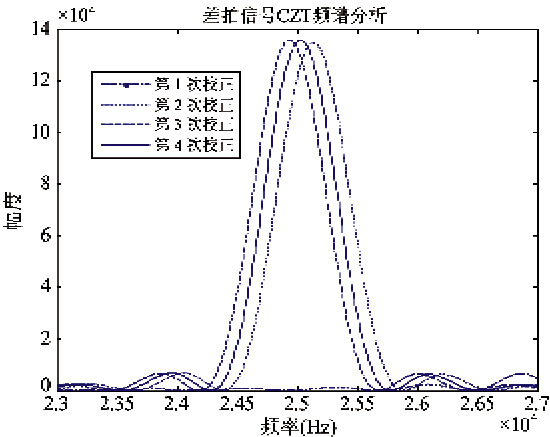


图7 搜索态下对差拍频率的CZT校正过程

当CZT校正过程进行到第5次时系统进入稳态,计算得到的高度输出如图8所示。

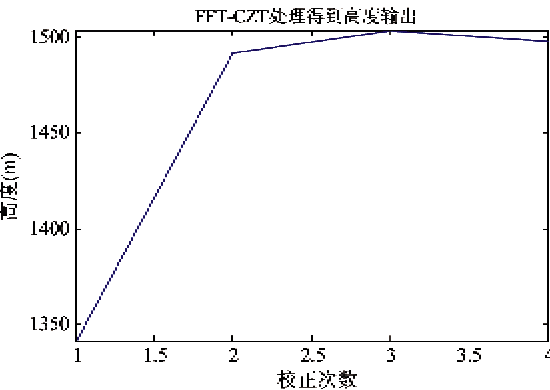


图8 实际高度为1.5km时FFT-CZT处理结果

在相同高度及噪声条件下,利用控制及跟踪鉴频器得到的模拟处理结果如图9所示。

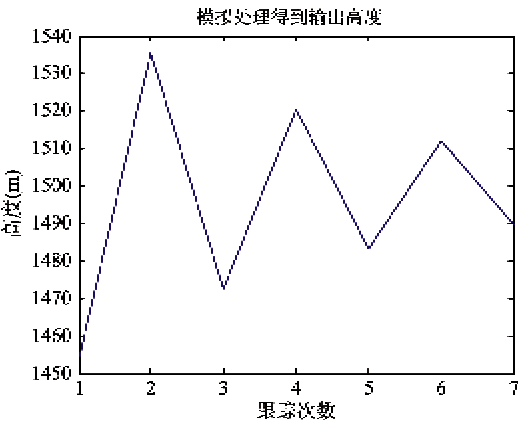


图9 实际高度为1.5km时模拟处理结果

为了比较不同高度时两种方法的测量精度,在以下5个高度值条件下分别利用模拟处理及FFT-CZT处理系统进行测量,得到的输出结果记录如

表 2 所示。

表 2 不同高度测量结果

测量高度(m)	1500	1000	500	100	50
模拟处理	1490	1004	496.3	99.77	49.13
FFT-CZT	1497	1001	501.1	100.1	50.07
模拟处理 误差率(%)	0.67	0.4	0.74	0.23	1.74
FFT-CZT 误差率(%)	0.2	0.1	0.22	0.1	0.14

通过仿真结果可知运用 FFT-CZT 算法的测高系统的输出结果准确度更高,且误差率均低于 0.3%,测量结果较传统的模拟系统更为精确,同时采用数字处理,避免了模拟体制中的搜索鉴频器和跟踪鉴频器容易受干扰的问题。

4 结 论

随着机载设备性能的提高,飞行器对无线电高度表的安装尺寸、精度、抗干扰性能也提出了更高的要求。本文将 FFT-CZT 算法应用于采用矢量对消器的单天线恒差拍体制 LFMCW 无线电高度表系统中,先用 FFT 技术进行频谱粗分析,再用 CZT 技术进行频谱细分,解决了频率分辨率与计算时间的矛盾。在对主要参数详细设计后进行了系统仿真,结果表明:相对于模拟处理系统,数字信号处理技术的

应用使测量精度明显提高,系统的可靠性大大改善。由于单天线 LFMCW 需要对天线端口直接发射的信号进行对消,当实际高度为零米时,系统将无法区别实际高度是零米还是从天线端口直接反射回的信号,因此单天线 LFMCW 只能应用于测量高度不为零的应用场合。

参考文献

- [1] 朱启明. 无线电高度表设计理论基础. 北京:国防工业出版社, 1992. 3-7, 25-82
- [2] Zhang F, Zeng G Q, Wei Z M. A study of cancelling the leakage signal with a RPC for single antenna FMCW radar altimeter. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2011, 135:127-135
- [3] 丁勇, 徐晶. 调频连续波无线电高度表的计算机仿真. *计算机应用*, 2009, 29(6):317-322
- [4] 杨毅, 韩宁, 刘建新. 基于 FFT 的恒差拍 FMCW 高度表数字信号处理器设计. *信息与电子工程*, 2009, 7(1):48-51
- [5] Rabiner L, Schafer R. The chirp z-transform algorithm. *Audio and Electroacoustics IEEE Transactions*, 1969, 17(2): 86-92
- [6] Tarasiuk T. Application of CZT transform for spectrum analysis in system with varying frequency. In: *IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*, Dortmund, Germany, 2007. 329-334
- [7] Leng H J, Yu S, Li X, et al. Frequency offset estimation for optical coherent M-QAM detection using chirp z-transform. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(9): 787-789

The FFT-CZT algorithm's application in single-antenna LFMCW radio altimeters

Zeng Guoqi*, Li Siyin**, Wang Song*, Qi Dianhai*, Rao Ganxin***

(* UAV Research Academy, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191)

(** School of Electronic and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191)

(*** Department of Technology Development, Guihang Aircraft Research Academy, Anshun 561000)

Abstract

A LFMCW (linear frequency modulated continuous wave) radio altimeter system with a single antenna was established, which is characterized by using the vector cancellation technology to cancel the RF signal coming from the circulator's leaking and the reflection of the antenna's stationary waves. The technique of combining the fast Fourier transform (FFT) with the chirp Z-translation, called the FFT-CZT technique for short, was used to analyze the IF signal created by mixing emission signal with echo signal (Firstly the FFT algorithm was adopted to analyze signals' spectra coarsely, and then the CZT algorithm was used to analyze signals' spectra precisely) to solve the conflict of frequency resolution and calculation time and improve the system's anti-interference ability and measurement accuracy. The working procedure of the single-antenna LFMCW radio altimeter system was simulated, and the simulation results show that the application of the FFT-CZT algorithm to single-antenna LFMCW radio altimeters is feasible. The system can be used in height measurement except in the zero altitude instance. And compared with the traditional analog system, the measurement accuracy and the anti-interference ability of the system are improved obviously.

Key words: linear frequency modulated continuous wave (LFMCW), radio altimeter, single-antenna, FFT-CZT, vector canceller