

УДК 621.396

В.К. Иванов, О.Е. Марыкивский, А.О. Силин

Институт радиопроизводства и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков

МОБИЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Рассмотрены принцип действия, структура и основные технические характеристики мобильной компьютеризированной радиолокационной установки наземного базирования для исследования характеристик рассеяния радиоволн сантиметрового диапазона участками местности с растительным покровом, в частности, полями сельскохозяйственных культур. Обоснован выбор элементной базы для устройства оцифровки данных аналоговых измерений и передачи информации в персональный компьютер.

Ключевые слова: радиолокатор, комплексная матрица рассеяния, разделитель поляризацій, поляризационная развязка, интерфейс.

Введение

Радиолокационные методы обзора земной поверхности в настоящее время широко используются в интересах сельского хозяйства для определения границ полей, занятых различными культурами, оценки плотности посевов, влажности почвы, влаго-содержания и зрелости растений [1 – 3]. Все эти параметры влияют на интенсивность отражения радиолокационных сигналов, которую принято характеризовать эффективной площадью рассеяния (ЭПР). Эта классическая для радиолокации характеристика отражения сосредоточенной цели распространена и на распределенные цели. В частности, удельная ЭПР используется для количественной оценки интенсивности рассеивания электромагнитных волн различными типами поверхности. Однако ЭПР не дает информации об изменении фазы волны при отражении. Вместе с тем, при облучении поляризованной волной различных поверхностей под различными углами, фаза коэффициента отражения и степень деполяризации отраженной волны могут существенно меняться. Характер флуктуаций отраженного сигнала может зависеть от вида и физико-химических параметров растительных покровов, направления и скорости приземного ветра.

Наиболее полно характеристики отражения могут быть представлены комплексной матрицей рассеяния (или матрицей эффективной длины цели), связывающей ортогональные составляющие напряженностей падающей \dot{E}_1 и отраженной \dot{E}_2 волн, взятых в одном и том же поляризационном базисе. Для радиолокационного наблюдения земной поверхности наиболее удобен базис, в котором горизонтальный орт \vec{e}_1 параллелен средней плоскости поверхности и перпендикулярен направлению распространения волны, а вертикальный орт \vec{e}_2 лежит в плоскости падения волны, перпендикулярен вектору распространения и горизонтальному орту. В этом базисе

$$\dot{E}_2 = \begin{pmatrix} \dot{E}_{2В} \\ \dot{E}_{2Г} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{E}_{2В} \\ \dot{E}_{2Г} \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{4\pi R}} \begin{pmatrix} \dot{i}_{ВВ} & \dot{i}_{ВГ} \\ \dot{i}_{ГВ} & \dot{i}_{ГВ} \end{pmatrix} = \dot{E}_2 \frac{1}{\sqrt{4\pi R}} \dot{L},$$

где \dot{L} – матрица эффективной длины цели, а множитель $1/\sqrt{4\pi R}$ устраняет зависимость элементов матрицы от расстояния до цели R . Для однопозиционной радиолокационной установки перекрестные элементы матрицы равны между собой, а абсолютные значения фаз ее элементов не имеют практического смысла. Поэтому матрицу эффективной длины целесообразно представить в виде

$$\dot{L} = \begin{pmatrix} \dot{i}_{ВВ} & \dot{i}_{ВГ} e^{j\Delta\varphi_{ВГ}} \\ \dot{i}_{ГВ} e^{j\Delta\varphi_{ВГ}} & \dot{i}_{ГВ} e^{j\Delta\varphi_{ГГ}} \end{pmatrix},$$

где $\Delta\varphi_{ВГ} = \varphi_{ВГ} - \Delta\varphi_{ВВ}$, $\Delta\varphi_{ГГ} = \varphi_{ГГ} - \Delta\varphi_{ВВ}$, т.е. матрица однозначно определяется пятью независимыми величинами: тремя модулями $\dot{i}_{ВВ}$, $\dot{i}_{ГГ}$, $\dot{i}_{ГВ} = \dot{i}_{ВГ}$ и двумя разностями фаз их аргументов $\Delta\varphi_{ВГ}$, $\Delta\varphi_{ГГ}$. Все их можно найти применяя когерентный радиолокатор, позволяющий излучать поочередно волны вертикальной и горизонтальной поляризацій, а принимать одновременно отраженные сигналы обеих поляризацій.

Целью разработки, которой посвящена данная статья, являлось создание наземного мобильного когерентного радиолокационного комплекса (в дальнейшем изложении – радиолокатора), который бы позволял измерять все вышеуказанные величины, записывать их временные реализации и получать статистические характеристики, в том числе спектры флуктуаций в полосе частот до нескольких сотен герц. Комплекс предназначен для исследования радиолокационных характеристик земной поверхности с растительными покровами (полей сельскохозяйственных культур) с целью установления их связи с физическими и агротехническими характеристиками последних. Использование поляризационных признаков должно повысить точность распознавания видов сельскохозяйственных культур по их радиолокационным изображениям. Исследования, проведенные с помощью радиолокатора на тестовых полигонах, по-

звolyт расширить базу данных радиолокационных образов полей с растительными покровами в различных погодных условиях. Эти данные в дальнейшем могут использоваться для верификации радиолокационной информации, получаемой с бортовых радиолокаторов летательных аппаратов.

Основной материал

Структура и принцип действия комплекса. Разработанный радиолокатор работает в 3-см диапазоне радиоволн (длина волны 3,2 см). Позволяет в непрерывном режиме излучать поочередно сигналы двух ортогональных линейных поляризаций и принимать одновременно отраженные сигналы обеих поляризаций (согласованной и кроссовой) с измерением амплитуды и фазы отраженного сигнала. С помощью персонального компьютера (ПК), входя-

щего в состав радиолокатора, обеспечивается запись временных реализаций каждой характеристики с частотой оцифровки до 5 кГц и их последующая статистическая обработка.

Установка базируется на грузовом автомобиле. Передатчик, приемник и антенная система размещаются на телескопической мачте, обеспечивающей высоту подъема до 15 м. Угол визирования антенн регулируется в пределах от 10° до 70° от нормали к поверхности. Мощность передатчика 180 мВт, чувствительность приемника не хуже – 80 дБм. Ширина диаграммы направленности антенн – 11° в плоскости вектора E и 14° в плоскости вектора H. Коэффициент усиления около 22 дБ. Поляризационная развязка каналов не менее 30 дБ.

Структурная схема радиолокатора приведена на рис.1.

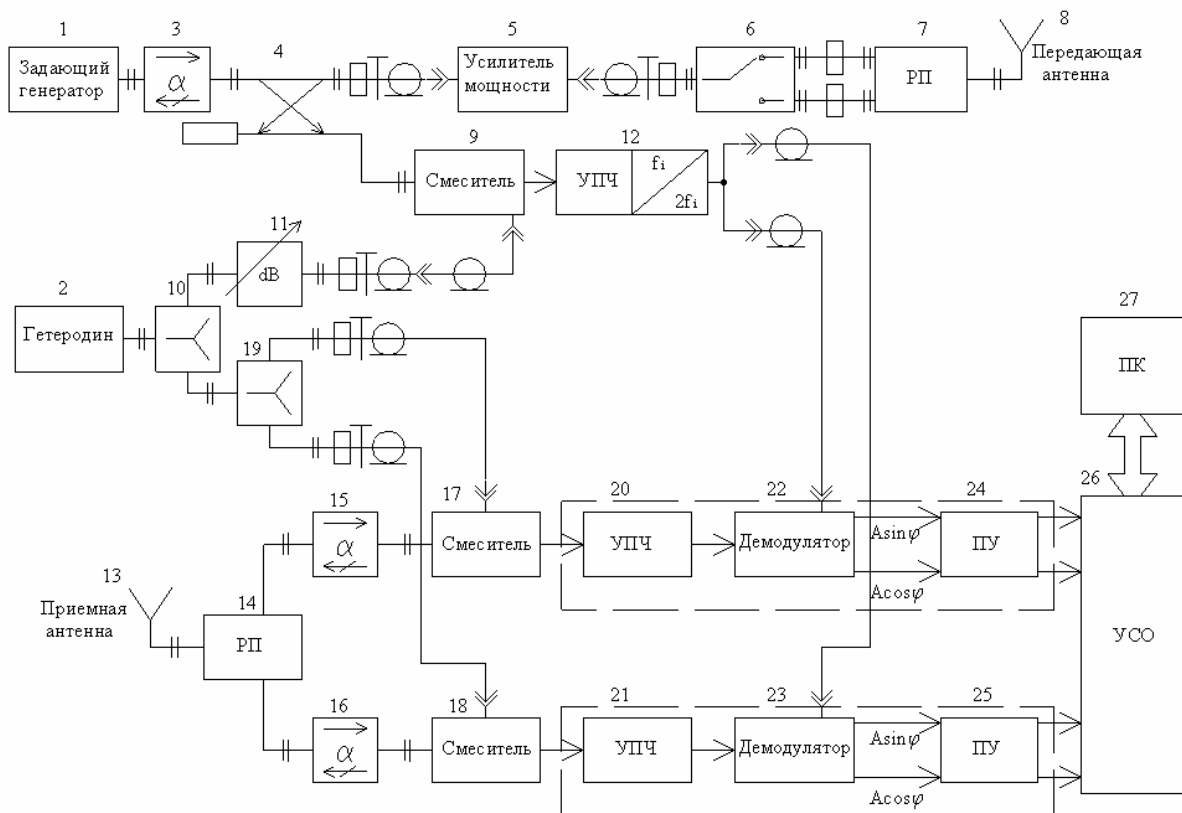


Рис. 1. Структурная схема радиолокатора

В качестве задающего генератора 1 и гетеродина 2 используются генераторные модули на диодах Ганна, частоты которых смещены друг относительно друга на 80 МГц – значение промежуточной частоты (ПЧ). Сигнал задающего генератора через развязывающий вентиль 3 и первичный канал направленного ответвителя 4 поступает на вход усилителя мощности 5, где он усиливается до уровня около 200 мВт и подается через механический волноводный переключатель 6 на один из двух входов разделителя поляризаций (РП) 7, выход которого (волновод сечением 21x21 мм) подключен непосредственно ко входу передающей антенны 8 – пирамидального рупора с раскрытием 150x150 мм и длиной 330 мм. Часть сигнала задающе-

го генератора через вторичный канал ответвителя 4 подается на волноводный вход смесителя 9. На коаксиальный вход этого смесителя подается сигнал гетеродина 2 через двойной волноводный тройник 10 и аттенуатор 11, позволяющий устанавливать уровень этого сигнала, необходимый для нормальной работы смесителя 9. С выхода этого смесителя сигнал ПЧ частотой $f_i = 80$ МГц поступает на вход усилителя промежуточной частоты (УПЧ) 12. После усиления частота сигнала удваивается собранным в том же корпусе множителем частоты. Этот сигнал разветвляется на два идентичных выхода и используется в качестве опорного для демодуляторов в двух каналах приемного тракта радиолокатора.

Отраженный от земной поверхности сигнал принимается антенной 13, по конструкции полностью идентичной передающей. Аналогичный РП 14 выделяет из него сигналы двух взаимно ортогональных поляризаций и направляет каждый из них в свой приемный канал. Через развязывающие вентили 15, 16 эти сигналы подаются на волноводные входы двух идентичных смесителей 17, 18, на коаксиальные входы которых поступает разветвленный двумя волноводными тройниками 10, 19 сигнал гетеродина 2. Сигналы ПЧ ($f_i = 80$ МГц) с выходов смесителей каждого канала усиливаются идентичными УПЧ 20, 21 и поступают на входы квадратурных демодуляторов 22, 23, собранных на микросхеме RF2713 фирмы RF Micro Devices. На опорные входы демодуляторов поступают сигналы удвоенной ПЧ с выходов УПЧ 12.

На выходах демодулятора образуются две пары демодулированных квадратурных сигналов (по одной с каждого канала), пропорциональных $A \sin \varphi$ и $A \cos \varphi$, где A – амплитуда отраженного сигнала соответствующей поляризации, а φ – разность фаз излученного и принятого сигналов. В преобразователях уровней (ПУ) 24, 25 напряжения этих сигналов приводятся к уровням, обеспечивающим наиболее эффективную работу устройства согласования с объектом (УСО) 26, в котором происходит их оцифровка. ПУ необходимы потому, что на выходах квадратурных демодуляторов отсутствию сигнала соответствует уровень постоянного напряжения $2,4 \pm 0,4$ В, а максимальная амплитуда сигнала (в режиме насыщения) около 1 В. Вместе с тем один из диапазонов входных напряжений используемых в УСО аналогоцифровых преобразователей (АЦП) составляет ± 5 В. Поэтому в ПУ осуществляется сдвиг постоянных напряжений с выходов квадратурных демодуляторов в область нулевых значений и расширение динамического диапазона полезных сигналов за счет введения предварительных усилителей.

С выхода УСО информация в цифровой форме передается в ПК 27, с которого осуществляется управление сеансами записи, и где проводится математическая обработка полученных реализаций. Остановимся более подробно на таких важных узлах радиолокатора, как разделитель поляризаций и УСО.

Разделитель поляризаций. Одной из важных радиолокационных характеристик различных типов земной поверхности является соотношение величины отраженных сигналов согласованной и кроссовой поляризаций, которые могут отличаться в десятки и сотни раз. Поэтому для достоверной оценки этой характеристики желательно чтобы РП обеспечивал максимально возможную поляризационную развязку (обычно не менее 30...40 дБ). Для данного радиолокатора была предложена волноводная конструкция РП со ступенчатым переходом. Эскиз такого РП в разрезе представлен на рис. 2.

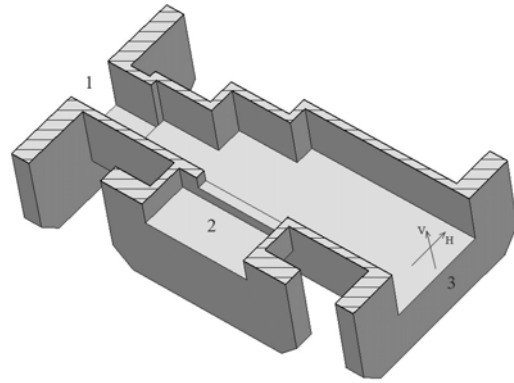


Рис. 2. Разделитель поляризаций

При использовании РП в передающем тракте его входами 1 и 2 являются волноводные каналы стандартного прямоугольного сечения 23×10 мм, а выходом 3 волноводный канал квадратного сечения 21×21 мм, к которому непосредственно подсоединяется вход пирамидального рупора. Сигнал со входа 1 возбуждает на выходе 3 волну горизонтальной поляризации (вектор H на рис. 2), а сигнал со входа 2 – волну вертикальной поляризации (вектор V). В приемном тракте входом РП, к которому присоединен приемный пирамидальный рупор, является канал 3, а выходами сигналов горизонтальной и вертикальной поляризаций – соответственно каналы 1 и 2. Оптимизация конструкции РП для заданного частотного диапазона была проведена с помощью компьютерного моделирования методом конечных элементов. Рассчитанные частотные характеристики РП приведены на рис. 3. На графиках значение индекса n определяет соответствующий вход (выход) РП, а индекса i – поляризацию сигнала на выходе (входе) 3. На рис. 3, а представлены модули коэффициентов передачи сигналов согласованной поляризации, а на рис. 3, б модули коэффициентов преобразования в ортогональную (т.е. паразитную) поляризацию. На рис. 3, в показана величина КСВН соответствующих входов РП.

Экспериментально поляризационная развязка в канале РП – передающая антенна – приемная антенна – РП была измерена на изготовленных макетах антенных рупоров и РП следующим образом. Две антенны с РП были установлены соосно на треногах на расстоянии около 3 м (что вдвое превышает начало дальней зоны для этих антенн) и ориентированы навстречу друг другу. На входы 1 и 2 РП, подсоединенного к одной из антенн (передающей), поочередно подавался сигнал рабочей частоты от генератора СВЧ. На выходах 1 и 2 РП, подсоединенного к приемной антенне, измерялся уровень принятого сигнала. Обеспечивалась возможность вращения приемной антенны вокруг своей оси с отсчетом угла поворота. Разность между максимальным и минимальным значением уровня принятого сигнала при таком вращении соответствовала поляризационной развязке. По результатам эксперимента она составила 40 дБ.

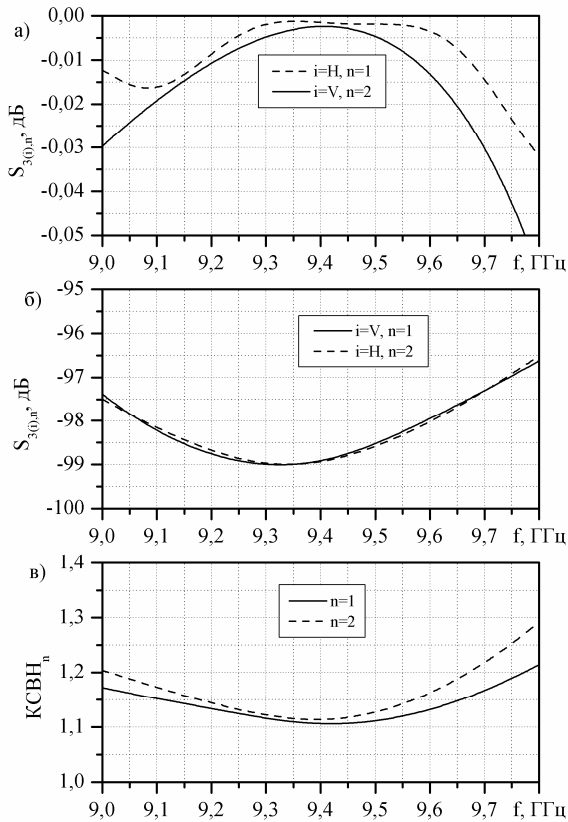


Рис. 3. Рассчитанные характеристики РП

Устройство согласования с объектом. На выходе аналоговой части радиолокатора информация об измеряемых параметрах содержится в сигналах на выходах 4 каналов напряжением до 5 В и шириной спектра, доходящей до сотен герц. Для обработки результатов измерений необходимо ввести их в ПК, расположенный на расстоянии около 20 м от установленной на мачте радиофизической аппаратуры. Трансляция аналоговых сигналов на такие расстояния видится нерациональным в окружении высокочастотных и низкочастотных помех и постоянным изменением положения пучка проводов относительно источников помех. Оптимальным является преобразование аналоговых сигналов в их дискретный эквивалент и передача цифровой информации в ПК. Аналого-цифровое преобразование сигналов и протоколы передачи информации реализованы в УСО.

Состав и параметры УСО его определяются основными функциями, которыми являются: дискретизация сигналов во времени и по амплитуде. Основными характеристиками следует считать частоту дискретизации АЦП, которая выбирается исходя из максимальной ожидаемой ширины спектра принимаемых сигналов, и его разрядность, от которой зависит динамический диапазон и величина погрешности измерения амплитуды сигналов. При выборе частоты дискретизации принято исходить из теоремы Котельникова, утверждающей, что произвольный сигнал, спектр которого не содержит частот выше f_c , может быть полностью восстановлен, если известны отсчетные значения этого сигнала,

взятые через равные промежутки времени. $\Delta t \leq f_c / 2$. Однако если интервал дискретизации задается исходя из этого граничного соотношения, погрешность измерения может быть как минимальной, так и достигать 100%. В случае синусоидального сигнала отсчеты во времени могут совпадать с амплитудными значениями синусоидального сигнала и погрешность от дискретизации минимальна. В случае совпадения отсчетов во времени с нулевыми значениями синусоидального сигнала погрешность от дискретизации максимальна и достигает 100%. Подобные рассуждения были проведены для модуляционной погрешности модуляционно-демодуляционных (МДМ) преобразований [4] в случае МДМ-преобразовательных усилителей. Очевидно, что достоверная передача сигнала $x(t)$ через устройство должна производиться конечным числом отсчетов на каждый период равным $n = \omega / \Omega$, где для МДМ-усилителей ω – частота несущего сигнала, а Ω – частота передаваемого процесса. При рассмотрении случая дискретизации во времени, ω – это частота дискретизации. Как показано в [4], для МДМ-усилителей в этом случае возникает так называемая модуляционная погрешность, проявляющаяся в том, что выходная величина при неизменной амплитуде входной величины непрерывно колеблется вокруг значения $(X + X_1) / 2$ с амплитудой $(X - X_1) / 2$ и частотой биений между ω и Ω . В последних выражениях X соответствует входной величине при совпадении времени взятия отсчета с ее максимальным значением, а величина X_1 соответствует входной величине при отсчетах в моменты до достижения максимального значения и после его прохода, при этом отсчеты равноудалены от максимального значения. Как уже отмечалось, в случае истинного значения X , максимум значения X_1 отстает от максимального значения X на угол $\psi = \pi / n$ и, очевидно, что максимальный разброс $\Delta_{max} = X - X_1 = X(1 - \cos(\pi/n))$. Относительная величина погрешности с учетом градуировки по среднему соответственно выразится как $\gamma_{max} = \Delta_{max} / 2X = (1 - \cos(\pi/n)) / 2$. Это выражение получено из расчета восстановления по положительному (или по отрицательному) полупериодам несущего напряжения в случае МДМ-преобразовательных усилителей. Поскольку при дискретизации процесса оцифровка ведется по двум полупериодам, то вычисления необходимо проводить для удвоенного значения n . Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Погрешности, обусловленные дискретизацией

$n = \omega / \Omega$	5	10	15	20	30	50
$\gamma, \%$	2,4	0,6	0,27	0,15	0,07	0,02

Как видно, приемлемые значения погрешности измерения, обусловленные дискретизацией во времени непрерывного процесса, достигаются при $n \geq 10$.

Источником второй составляющей погрешности процесса дискретизации является дискретизация по уровню. Дискретизация осуществляется АЦП, имеющим интервал ΔU между соседними дискретными уровнями при максимальном значении измеряемого напряжения $U = \Delta U \cdot N$. Количество уровней N определяет количество двоичных разрядов на выходе – бит. В общем случае средняя квадратичная погрешность дискретизации по уровню определяется как $\delta_y = (\Delta U) / (2\sqrt{3})$. При заданном значении средней квадратичной погрешности необходимое число уровней $N = 100 / (\delta_y \cdot 2h\sqrt{3})$, где $h = 0, 1 \dots 0, 2$.

Для того чтобы погрешность от дискретизации по уровню не превышала 0,5%, необходимо иметь число уровней $N \geq 289$. Ближайшее большее значение, кратное 2^n , – 512, что соответствует 9-разрядному однополярному АЦП или 10-разрядному двуполярному АЦП.

Вышесказанное позволяет сделать выводы, что при заданной верхней частоте спектра исследуемых сигналов 500 Гц и приемлемой погрешности дискретизации во времени частота дискретизации должна быть не менее 5000 Гц. Для приемлемой погрешности измерения от дискретизации по уровню необходимо применять 10-разрядный АЦП. Учитывая наличие 4 аналоговых каналов измеряемых сигналов, частота дискретизации во времени должна составлять не менее 20 кГц или для любого последовательного канала более 160 кГц – 160 кбит/с. Объем передаваемой информации за период времени 10 с составит более (1...2) Мбит. Для передачи дискретной информации на расстояние более 20 м со скоростью более 160 кбит/с нецелесообразно применение физических интерфейсов типа RS232, RS444 или им подобных, так как для них отсутствуют эффективные логические протоколы передачи больших объемов информации. Применение интерфейса USB невозможно ввиду большой длины линии связи. Применение других высокоскоростных интерфейсов типа CAN или им подобных неперспективно из-за больших объемов информации. Наиболее целесообразно использование интерфейса Ethernet, имеющего высокую скорость передачи, развитый протокол передачи информации. Реализация интерфейса Ethernet обуславливает введение в состав УСО процессора (микропроцессора). Простейшие микропроцессорные микросхемы, например с 8051 ядром обеспечат работу с Ethernet, однако, кроме передачи данных по каналу связи существуют и другие операции (управление АЦП, накопление массивов данных и т.п.). В этом случае опыт работы, литературные источники рекомендуют использование более мощных 16- и 32-битных процессоров. Анализ процессорных устройств, выпускае-

мых серийно, приводит к выводу о целесообразности использования устройств на широко распространенных процессорах с 380 ядром. Такое устройство для встраиваемых приложений имеет стандартную структуру современного ПК: BIOS, устройства ввода/вывода (включая вывод на дисплей и ввод с клавиатуры, каналы IDE), ОЗУ, Ethernet и другие средства ПК. Важным является то, что для таких устройств существует и ряд широко известных операционных систем и языков программирования. Все это вместе упрощает задачу проектирования и уменьшает время на разработку. Для решения рассматриваемой задачи не требуется высокоскоростных устройств, а возможно применение устройств со средней скоростью процессора на уровне 300...500 МГц. В настоящее время выпускаются два основных конструктивных направления с 380 ядром. Первое направление с полной структурой ПК и выводом на торцевые разъемы шин ISA или PCI (или ISA и PCI одновременно). Это направление носит название одноплатных компьютеров – Single Board Computer (SBC) с торцевыми разъемами. Второе направление SBC это PC104, более ранняя разработка аналогичных вычислительных средств. Существует много вариантов плат PC104 с различным быстродействием процессора, на которых кроме полного комплекта средств ПК существуют средства аналогового и цифрового ввода/вывода. Это платы, содержащие процессоры с малым (менее 200 МГц) и средним (более 200 МГц) быстродействием. Для УСО представляют наибольший интерес PC104 невысокой стоимости с малым быстродействием. Не проводя анализ подобных устройств (количество фирм, производящих эти устройства достигает десятков, при номенклатуре плат на этих фирмах исчисляемых десятками) остановимся на SBC фирмы Micro/sys SBC0486.

SBC0486 – продвинутая, высокоинтегрированная плата на базе процессора 486DX с частотой 133 МГц, размером 5 на 5 дюймов. Процессор интегрирован с 64 Мбайт динамической памяти и до 78 Мбайт (типа Disk-On-Chip) перепрограммируемой энергонезависимой памяти. Содержит все составляющие стандартного ПК: последовательный и параллельный порты, контроллер клавиатуры и ручного манипулятора – мышки, контроллер монитора, контроллер жесткого и гибкого дисков. И, что очень важно, имеет встроенный 10/100BASE-T Ethernet. Кроме Ethernet имеется необходимый для УСО ввод аналоговых сигналов.

Для ввода аналоговых сигналов используется АЦП фирмы Maxim Max197. Это 12-битный преобразователь, имеющий 8 аналоговых входов с программируемыми диапазонами входных напряжений ± 10 В, ± 5 В, 0 В ... +10 В или 0 В...+5 В. Время преобразования входного напряжения в двоичный эквивалент 6 мкс, что позволяет проводить оцифровку со скоростью до 100 ksp/s. Таким образом, технические данные АЦП, определяющие параметры

вывода аналоговых сигналов для SBC0486, соответствуют ранее определенным требованиям для УСО. АЦП имеет функцию защиты от превышения входного напряжения, достигающего $\pm 16,5$ В. Следует отметить, что SBC0486 имеет функцию вывода аналоговых напряжений по 4 каналам 12 битных цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) в диапазоне 0 В...+5 В с временем преобразования дискретного значения в аналоговый сигнал 3 мкс. На плате SBC0486 установлены не характерные для ПК: трехсекционный таймер с 16 бит на каждую секцию, сторожевой (Watchdog) таймер с устанавливаемым временем до 1,6 сек, три порта по 8 бит ввода/вывода цифровой информации.

Поскольку SBC0486 имеет все упомянутые выше составляющие стандартного ПК, появляется возможность проводить проектирование и отладку программных средств непосредственно с участием платы SBC0486. Можно применить в качестве операционной среды (ОС) как средства DOS, так и средства Windows. Безусловно, использование Windows требует как значительно больше вычислительных ресурсов для решаемой задачи создания УСО, так и снижает быстродействие в целом. Поэтому применение DOS предпочтительно. Поэтому программа управления работой УСО реализована в ОС DOS с применением языка Си. Алгоритм программы обеспечивает измерение входных сигналов по 4 каналам с выбором одного из 4 возможных диапазонов напряжений и организацию передачи измеренных значений по каналу 100BASE-T Ethernet. Вариант накопления данных с последующей передачей их оказывается менее быстродействующим, поскольку при больших объемах информации для DOS приходится писать их в защищенную область с большими временными потерями. Для ПК написана программа, которая передает по 100BASE-T Ethernet управляющие данные для программы, функционирующей в УСО, и принимает передаваемые из УСО данные по 100BASE-T Ethernet. Входным параметром этой программы является командная строка, содержащая номера каналов, участвующих в измерении, диапазон входных напряжений этих каналов,

частоту дискретизации и имя файла, в который будет записываться передаваемые из УСО данные. Результатом работы программы является файл, содержащий информацию о рабочих каналах, диапазоне и данные измерения сигналов по каналам. Объем получаемой информации (длина реализации) определяется командой, подаваемой оператором с ПК.

Выводы

Таким образом, создан компьютеризированный мобильный комплекс наземного базирования для исследования радиолокационных характеристик участков местности с различным растительным покровом. Разработано необходимое программное обеспечение и проверены функциональные возможности комплекса. Его использование позволит расширить архив радиообразов подстилающих поверхностей и проводить верификацию данных, получаемых с бортовых радиолокаторов летательных аппаратов.

Список литературы

1. Радиолокационные методы исследования Земли / Ю.А. Мельник, С.Г. Зубкович, В.Д. Степаненко и др.; под ред. Ю.А. Мельника. – М.: Сов. радио, 1980. – 264 с.
2. El-Rayes M.A. Microwave Dielectric Spectrum of Vegetation. –Part 1: Experimental Observations / M.A. El-Rayes, F.T. Ulaby // IEEE Trans. Geosc. Remote Sens. – 1987. – Vol. 25, No. 5. – P. 541-557.
3. Кулемин Г.П., Яцевич С.Е. Взаимосвязь обратного рассеяния радиоволн СВЧ диапазона с параметрами растительного покрова и открытых почв при дистанционных методах зондирования / Г.П. Кулемин, С.Е. Яцевич // Успехи современной радиоэлектроники. – М.: ИПРЖР, 2004. – № 3. – С. 24-34.
4. Электрические измерения неэлектрических величин / А.М. Туригин, П.В. Новицкий, Б.С. Левшина и др.; под ред. П.В. Новицкого. – Л.: Энергия, 1975. – 576 с.

Поступила в редколлегию 12.12.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.И. Сухаревский, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

МОБІЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

В.К. Иванов, О.Є. Марківський, О.О. Сілін

Розглянуто принцип дії, структуру та основні технічні характеристики мобільної комп'ютеризованої радіолокаційної установки наземного базування для дослідження характеристик розсіяння радіохвиль сантиметрового діапазону ділянками місцевості з рослинним покривом, зокрема, полями сільськогосподарських культур. Обґрунтовано вибір елементної бази для пристрою оцифрування даних аналогових вимірювань та передачі інформації до персонального комп'ютера.

Ключові слова: радіолокатор, комплексна матриця розсіяння, розділювач поляризації, поляризаційна розв'язка.

MOBILE SYSTEM FOR INVESTIGATION THE RADAR RESPONSES OF THE AGRICULTURAL FIELDS

V.K. Ivanov, O.E. Marykivskiy, A.O. Silin

Operating principle, structure and main performance specification of the mobile computerized ground-based radar system for investigation X-band radio waves backscattering by terrains with growth, specifically agricultural crops, are considered. Choice of device elements for analog data digitizing and information transmission to personal computer is justified

Keywords: radar, complex scattering matrix, polarization separator, polarization isolation, interface.