

Radartutorial

Buch 7 „Intrapulse Modulation“

Die vorliegende Ausbildungshilfe ist eine Zusammenfassung von Seiten der Internetpräsentation „Radargrundlagen“ auf www.radartutorial.eu.

Hinweis: *Dieses Buch ist ein bearbeiteter und thematisch geringfügig erweiterter Auszug aus dem Buch 4. Wenn das Buch 7 genutzt wird, brauchen vom Buch 4 die Seiten 12,13 und 14 (Pulskompression) nicht ausgedruckt zu werden.*

Inhaltsverzeichnis:

Radartutorial.....	1
Lernziele:.....	1
Intrapulse Modulation	2
Intrapulse Modulation mit linearer Frequenzmodulation.....	3
Arbeitsprinzip der Pulskompression	3
SAW-Filter	4
Time-Side-Lobes	4
Pulskompression mit nicht-linearer Frequenzmodulation.....	5
Pulskompression mit Phasenmodulation.....	6
Wissenstest.....	7

Lernziele:

Die hier genannten Lernziele sollen einen Überblick über die zu erwartenden Themen in diesem Kapitel geben. Dieses Kapitel der Homepage „Radargrundlagen“ vermittelt Kenntnisse über Intrapulse Modulation und Pulskompressionsverfahren in Radargeräten. Am Ende dieses Kapitels sollte der Lernende:

- die Begriffe Intrapulse Modulation und Pulskompression kennen;
- die Vor- und Nachteile der Pulskompression aufzählen;
- die verschiedenen Modulationsmethoden kennen;
- die Impulsform eines linear frequenzmodulierten Sendeimpulses und eines symmetrisch nichtlinear frequenzmodulierten Sendeimpulses beschreiben;
- die Begriffe SAW Filter, Amplitudenwichtung und Time-Sidelobes kennen und den verschiedenen Modulationsmethoden zuordnen, in denen sie eine besondere Bedeutung haben.

Intrapulse Modulation

Impulsradargeräte älteren Typs benötigen eine große Impulsleistung zur Erzielung der gewünschten Reichweite. Gleichzeitig sollte der Sendeimpuls von möglichst kurzer Dauer sein, weil dadurch die Entfernungsauflösung beeinflusst wird. Deshalb musste bei diesen Radargeräten die gesamte Sendeenergie in nur wenigen Mikro- oder gar Nanosekunden erzeugt und abgestrahlt werden. Für diese Aufgabe wurden leistungsfähige Modulator- und Senderöhren entwickelt.

Sender in Solid- State- Technologie, also auf Halbleiterbasis aufgebaute Hochleistungssender sind aufgrund ihrer begrenzten Spannungsfestigkeit und ihrer begrenzten Arbeitstemperatur nicht in der Lage, solche hohen Impulsleistungen zu erzeugen. Um die gleiche Sendeenergie abzustrahlen, muss der Sendeimpuls also wesentlich länger sein.

Um das Entfernungsauflösungsvermögen eines Pulsradars mit relativ großer Sendeimpulsdauer zu verbessern, wird der Sendeimpuls moduliert. Jetzt kann im empfangenen Echo z.B. ein Frequenzvergleich durchgeführt werden, der es ermöglicht, eine Lokalisation innerhalb des Impulses vorzunehmen. Das Echosignal wird also in seiner Impulsdauer in speziellen Filtern komprimiert. Das Verfahren dazu wird Pulskompression genannt. Bei der Pulskompression werden die energetischen Vorteile sehr langer Impulse mit den Vorteilen sehr kurzer Impulse kombiniert. Durch die notwendige Modulation können selbstschwingende Sender dieses Verfahren nicht anwenden.

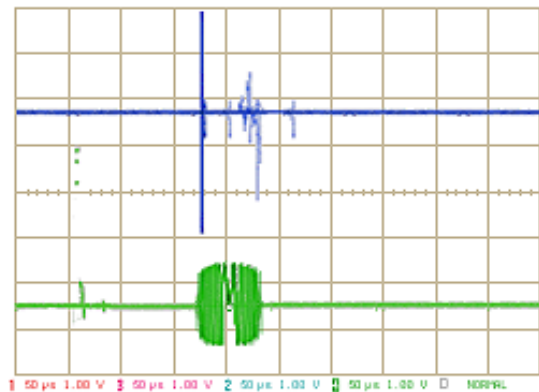


Bild 1: Oszillogramm eines klassisch kurzen Sendeimpulses (oben) und ein langer Sendeimpuls mit Intrapulse Modulation (unten)

Da das Rauschen immer breitbandig ist und der frequenzsynchrone Anteil des Rauschens im Vergleich zum Echosignal durch die statistische Verteilung eher gering ist, wird der Anteil des Rauschens durch die Pulskompressionsfilter derart verringert, dass auch dann noch ein Ausgangssignal erzielt wird, wenn das Eingangssignal schon längst im Rauschen untergegangen ist und für eine einfache Demodulation somit verloren wäre. Nachteil des Verfahrens ist allerdings, dass die minimale Messentfernung von den meist monostatischen Radargeräten sehr verschlechtert wird. Solange der Sender arbeitet, kann eben nichts empfangen werden, da der Sende- Empfangsumschalter während dieser Zeit die Empfänger sperrt. Auch die sich aus der Dauer der Empfangszeit errechnende theoretisch maximale Reichweite wird verringert, da das Echo genau so lang wie der Sendeimpuls ist und erst in seiner gesamten Länge empfangen werden muss, um ein Zielzeichen zu generieren.

Vorteile	Nachteile
geringere Impulsleistung	höherer Schaltungsaufwand
hohe Reichweite	schlechte minimale Messentfernung
sehr gute Entfernungsauflösung	Time-Sidelobes
gute Störfestigkeit	
schwerer aufklärbar	

Es sind dabei mehrere Modulationsverfahren anwendbar. Es gibt Intrapulse Modulationsverfahren mit

- linearer Frequenzmodulation,
- nicht-linearer Frequenzmodulation und
- codierter Puls-Phasenmodulation.

Intrapulse Modulation mit linearer Frequenzmodulation

Bei dieser Methode wird der Sendepuls linear frequenzmoduliert. Das hat den Vorteil, dass die Schaltung noch relativ einfach gehalten werden kann. Die lineare Frequenzmodulation hat aber den Nachteil, dass durch sogenannte „Sweeper“ relativ leicht Störungen erzeugt werden können.

Arbeitsprinzip der Pulskompression

Im folgenden Schaltungsbeispiel wird das Prinzip anhand von fünf im Sendepuls vorhandenen Frequenzen dargestellt.

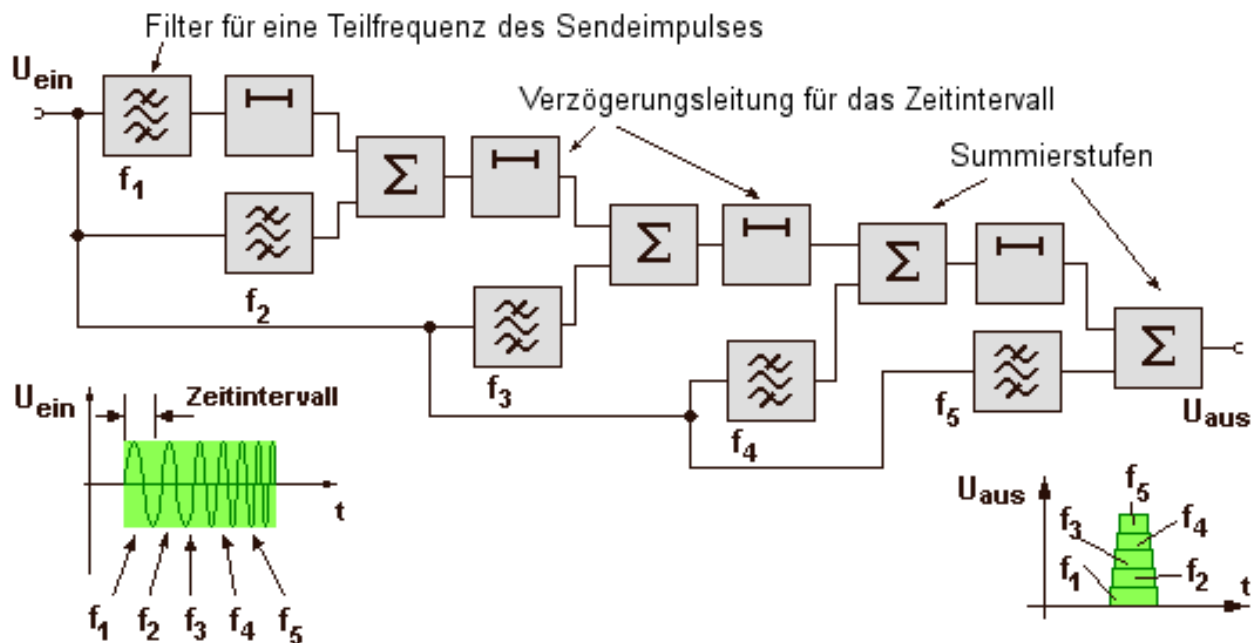


Bild 2: Prinzipschaltbild eines Pulskompressionsfilters

Dabei wird der Sendepuls in eine Anzahl Zeitintervalle mit angenommen konstanter Frequenz eingeteilt. Spezielle Filter für genau die Frequenz in dem jeweiligen Zeitintervall ergeben je ein Ausgangssignal, das in einer Kaskade aus Verzögerungsleitungen und Summierstufen zu einem Ausgangsimpuls addiert wird. Als Beispiel für eine Anwendung kann das Luftverteidigungsradargerät großer Reichweite RRP-117 genannt werden, welches zwei Impulse auf unterschiedlicher Grundfrequenz aussendet, die jede für sich linear frequenzmoduliert sind.

Der hohe Schaltungsaufwand ist mit der heutigen Integrationsmöglichkeit durchaus beherrschbar. Es gibt praktisch zwei prinzipielle Möglichkeiten, dieses Verfahren technisch zu realisieren:

- eine prozessorgesteuerte Datenverarbeitung (nach einer A/D-Wandlung)
- mit **SAW**- Filtern (**S**urface **A**coustic **W**ave devices).

Bei einer prozessorgesteuerten Datenverarbeitung verteilt sich der Echoimpuls anfangs auf viele Speicherplätze. Der Prozessor muss genau dieses Speicherbildmuster auch dann erkennen, wenn sich mehrere Echosignale überlagern.

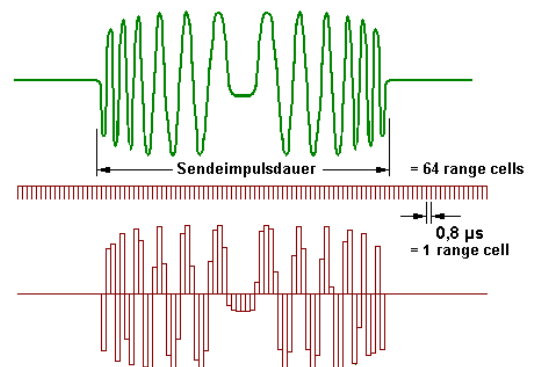


Bild 3: der Echoimpuls verteilt sich im Speicher auf viele Speicheradressen

SAW-Filter

SAW- Filter komprimieren das frequenzmodulierte Echosignal auf analogem Wege. Sie arbeiten nach dem piezoelektrischen Prinzip.

Auf einem Piezokristall ist ein breitbandiger Wandler aufgedampft, der die elektrischen Schwingungen in mechanische Schwingungen im Kristall umwandelt. Diese mechanischen Schwingungen breiten sich jedoch mit sehr viel kleinerer Geschwindigkeit aus, als die elektrischen Signale auf einer Leitung. Deshalb werden relativ hohe Verzögerungszeiten erreicht. Ebenfalls auf dem gleichen Kristall werden frequenzabhängige Wandler aufgedampft, welche die mechanische Energie wieder in elektrische Signale zurückwandeln.

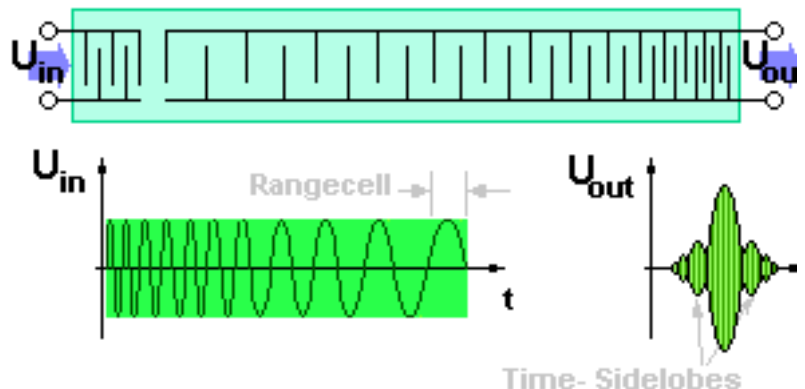


Bild 4: Schema eines SAW- Filters mit linear fallendem Fingerabstand

Durch den zwangsläufig unterschiedlichen Abstand dieser verschiedenen Wandler zum Erregersystem erhalten die verschiedenen Frequenzanteile des Eingangssignals eine unterschiedliche zeitliche Verzögerung, so dass alle Frequenzanteile des Eingangssignals in die gleiche **Rangecell** geschoben werden. Die im Bild gezeigte Aufbau wird vorwiegend bei einer linearen Frequenzmodulation genutzt. Der Fingerabstand bestimmt die genaue Resonanzfrequenz. Die erste Frequenz im Impuls (links) benötigt die größte Verzögerungszeit. Die auf den Piezokristall aufgedampften Finger mit genau dieser Frequenz befinden sich also am entgegengesetzten Ende der Einspeisung.

Time-Side-Lobes

Da aber die frequenzabhängigen Wandler (wie jedes Filter!) auch durch Oberwellen angeregt werden können, entstehen neben dem scharfen Ausgangsimpuls leider auch störende Nebenzipfel. Diese werden **time** oder **range sidelobes** genannt. (Der deutsche Begriff „Nebenzipfel“ wird nur noch sehr selten verwendet.) und müssen oft durch aufwändige Verfahren kompensiert werden.

Diese Time-Sidelobes sind Spiegelungen, die zu dem Zielimpuls zeitlich (d.h. in der Entfernung) versetzt sind. Die nebenstehende Grafik zeigt diese Spiegelungen, die einmal als Funktion der Zeit (auf dem Oszilloskop) und einmal als Funktion der Entfernung (auf einen Ausschnitt eines PPI- Sichtgerätes) gezeigt werden.

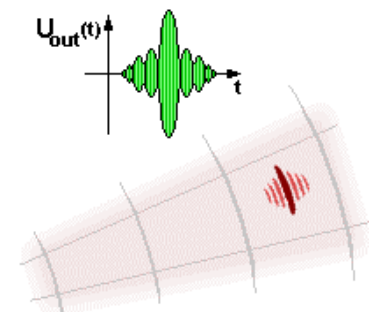


Bild 5: Ansicht der Time-Side-Lobes: oszillografisch und als analoges Video auf einem PPI-Sichtgerät

Da sowohl der zeitliche, als auch der Amplitudenabstand konstant sind, können mit einer Wichtung der Signalamplituden diese Nebenzipfel auf einen akzeptablen Wert reduziert werden. Wenn diese Amplitudenwichtung nur auf dem Empfangsweg vorgenommen wird, verursacht sie aber auch eine Verschlechterung des Filters und verringert den Signal-Rausch-Abstand.

Die Größe dieser Nebenzipfel sind ein wichtiger Parameter von Radargeräten mit Intrapulse Modulation und Pulskompression und können durch diese Amplitudenwichtung auf einen Wert im Bereich von -30 dB abgesenkt werden. Die Amplitudenwichtung ist allerdings nur bei prozessorgesteuerter Signalverarbeitung (oder einer Hardwarelogik) möglich. Das Berechnungsverfahren basiert im Wesentlichen auf der Methode, dass der Wert einer Rangecell mit seinen Vorgängern und Nachfolgern, die jeweils mit einem Wichtungsfaktor multipliziert wurden, addiert wird. Nebenzipfel werden dadurch mehr verkleinert, als das stärkste Nutzsignal.

Pulskompression mit nicht-linearer Frequenzmodulation

Die Pulskompression mit nicht-linearer Frequenzmodulation weist einige deutliche Vorteile auf. So benötigt sie z.B. für die Unterdrückung der Time-Sidelobes keine Amplitudenwichtung mehr, da bereits durch die Form der Modulation die Funktion der sonst nötigen Amplitudenwichtung erfüllt wird.

Ein Filterabgleich mit steileren Flanken bei trotzdem niedrigen Nebenzipfel ist nunmehr möglich. Auf diese Art werden die sonst durch die Amplitudenwichtung auftretenden Verluste im Signal-Rausch-Verhältnis vermieden.

Die Nachteile der Pulskompression mit nicht-linearer Frequenzmodulation sind:

- ein komplizierterer Schaltungsaufbau und
- eine komplizierte Modulation, damit auch jeder Sendepuls gleiche Eigenschaften bei der Einhaltung der bereits genannten Funktion der Amplitudenwichtung erhält.

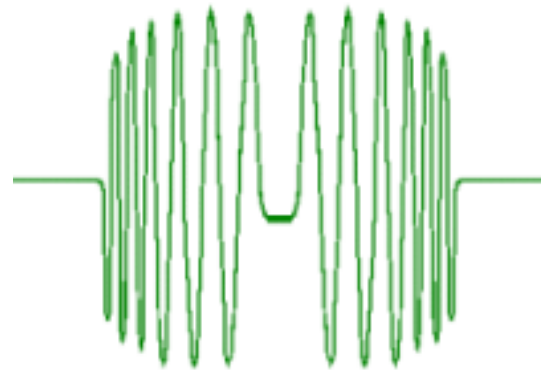


Bild 6: ein symmetrischer Sendepuls mit Intrapulse Modulation am Ausgang des Waveform-Generators (noch auf der ZF-Frequenz)

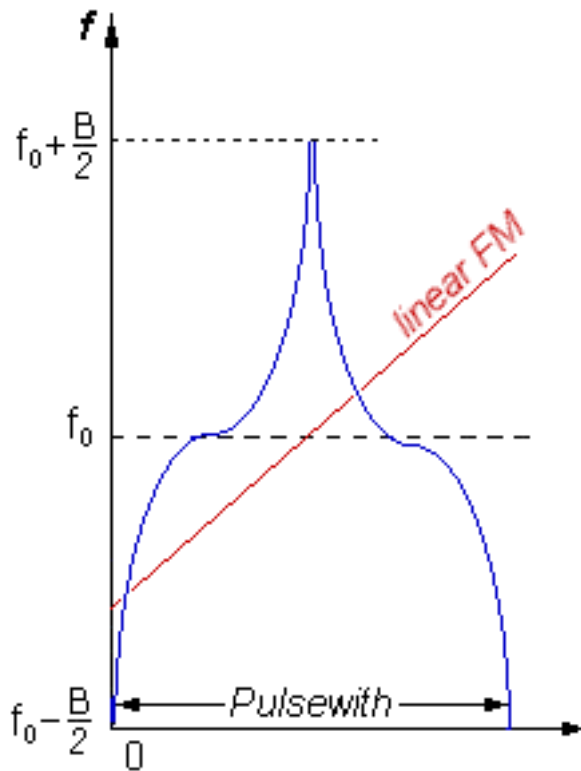


Bild 7: symmetrische Form

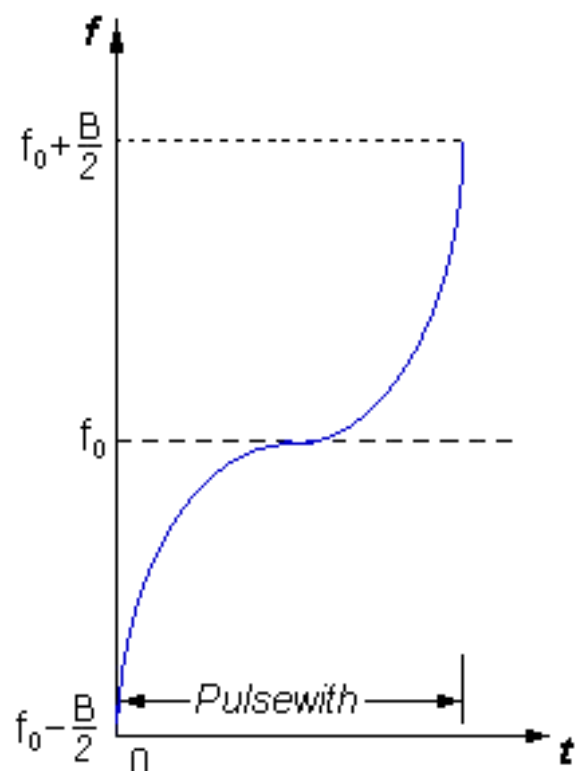


Bild 8: unsymmetrische Form

Die symmetrische Form der Modulation hat während der ersten Hälfte der Sendepulsdauer eine aufsteigende (oder abfallende) Frequenzänderung und in der zweiten Hälfte eine fallende (oder nun aufsteigende) Frequenzänderung. Eine unsymmetrische Form der Modulation erhält man, wenn von der symmetrischen Form nur eine Hälfte verwendet wird.

Pulskompression mit Phasenmodulation

Die phasenkodierte Impulsform unterscheidet sich von der frequenzmodulierten Impulsform darin, dass der lange Gesamtimpuls in kleinere Sub-Impulse gleicher Frequenz unterteilt ist. Diese Sub-Impulse repräsentieren immer eine Range-Cell, also die kleinste auflösbare Entfernung. Diese Subimpulse haben alle die gleiche Länge und innerhalb dieser Impulsdauer ist die Phase konstant. Zwischen den Sub-Impulsen kann ein Phasensprung programmiert werden. Meist wird dieser Phasensprung mit einem binären Code verknüpft.

Der binäre Code besteht aus einer Folge von logischen Zuständen. In Abhängigkeit dieses binären Codes wird die Phasenlage des Sendesignals zwischen 0 und 180° umgeschaltet. Im Gegensatz zum gezeigten und stark vereinfachten Bild ist die Sendefrequenz aber nicht unbedingt ein Vielfaches der Frequenz der Schaltimpulse. Die codierte Sendefrequenz wird an den Phasenumkehrpunkten also disharmonisch umgeschaltet.

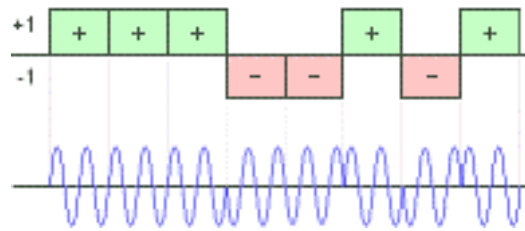


Bild 9: Diagramm eines Phasencodierten Sendepulses hier mit 8 Code-Elementen

Die Auswahl eines geeigneten Codes von diesen sogenannten 0/π-Phasen (π entspricht 180°) sehr kritisch. Als Optimum hat sich eine Anzahl von Impulsmustern im Barker-Code erwiesen. Dieses Optimum wird am Pegel der zu erwartenden Nebenzipfel gemessen. Es existiert nur eine geringe Anzahl optimaler Codes, die in untenstehender Tabelle aufgelistet sind. Eine rechnergestützte Studie hat bis zu 6000 verschiedene Barker-Codes untersucht und kam zu dem Ergebnis, dass nur die 13 einen maximalen Abstand des Signals zu den Nebenzipfeln hat.

Länge des Codes n	Code-Elemente	Signal-Nebenzipfelabstand
2	+ -	-6.0 dB
3	++ -	-9.5 dB
4	++ - + und +++ -	-12.0 dB
5	+++ - +	-14.0 dB
7	+++ - - + -	-16.9 dB
11	+++ - - + + - - + -	-20.8 dB
13	+++++ - - + + - + - +	-22.3 dB



Bild 10: schon das recht betagte AN/TPS-43 nutzte Puls-kompression mit Phasenmodulation mit der Länge von 13 Codes

Tabelle 1: ausgewählte Barker-Codes für Pulskompression mit Phasenmodulation

Radargeräte, die mit Interpulse Modulation arbeiten sind sehr viel schwerer aufzuklären. Um eine maximale Reichweite zu erzielen, benötigen sie weniger Impulsleistung und ihr Sendesignal verschwindet eher im Grundrauschen, als die klassischen Radargeräte. Auf diesen sehr geringen Signalpegel kann ein Aufklärungstool sie nur entdecken, wenn die Modulationsart und das Impulsmuster bekannt sind. Deswegen werden diese Radargeräte auch „Silent Radars“, also „stille Radargeräte“ genannt.

Wissenstest

Bitte beachten Sie, dass zu den Fragen auch mehrere Antworten richtig sein können!

1. Der Sendepuls mit einer Intrapulse Modulation hat eine Dauer von $64 \mu\text{s}$ und wird auf dem Empfangsweg auf $1 \mu\text{s}$ komprimiert. Damit beträgt eine Rangezell 150 m . Wie groß ist die minimale Ortungsreichweite des Radargerätes bei ausschließlicher Verwendung dieser Sendepulsdauer?
 - 150 m
 - 9600 m
 - größer als 9600 m

2. Das Luftverteidigungsradargerät RRP-117 verwendet zwei verschiedene Sendepulse mit einer Dauer von $100 \mu\text{s}$ und $800 \mu\text{s}$. Welche Einschränkungen ergeben sich daraus für die minimale und die theoretisch maximale Reichweite des Radargerätes?
 - Die theoretisch maximale Reichweite errechnet sich aus der Empfangszeit minus $800 \mu\text{s}$.
 - Die Empfangszeit wird berechnet nach $800 \mu\text{s} - 100 \mu\text{s} = 700 \mu\text{s}$.
 - Die minimale Reichweite wird bedingt durch die Impulsdauer von $100 \mu\text{s}$.

3. Welche Radargeräte können die Intrapulse Modulation und die Pulskompression verwenden?
 - Dauerstrichradargeräte mit Doppler-Verfahren
 - Impulsradargeräte
 - nicht kohärente Radargeräte
 - pseudo-kohärente Radargeräte
 - kohärente Radargeräte